НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ

ІНСТИТУТ ПРОБЛЕМ МОДЕЛЮВАННЯ В ЕНЕРГЕТИЦІ ІМ. Г.Є. ПУХОВА

МАТЕРІАЛИ VII НАУКОВО-ПРАКТИЧНОЇ КОНФЕРЕНЦІЇ «БЕЗПЕКА ЕНЕРГЕТИКИ В ЕПОХУ ЦИФРОВОЇ ТРАНСФОРМАЦІЇ»

20 листопада 2025 року

Київ – 2025

УДК [621.3+620.9]::[004[056.53+42+94] + 504.06]
ББК 31
Б-39

Рекомендовано до друку Вченою радою Інституту проблем моделювання в енергетиці ім. Г.Є. Пухова НАН України (протокол № 15 від 27 листопада 2025 р.)

Б-39 **Безпека енергетики** в епоху цифрової трансформації, VI науково-практична конференція Інституту проблем моделювання в енергетиці ім. Г.Є. Пухова Національної академії наук України : матеріали (Київ, 20 листопада 2025 р.). Київ : ІПМЕ ім. Г.Є.Пухова НАН України, 2025. 149 с.

B-39 **Energy security** in the digital transformation era, VI scientific-practical conference of the G.E. Pukhov Institute for Modeling in Energy Engineering National Academy of Sciences of Ukraine : materials (Kyiv, November 20, 2025). Kyiv: PIMEE NAS of Ukraine, 2025. 149 p.

НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ
ІНСТИТУТ ПРОБЛЕМ МОДЕЛЮВАННЯ В ЕНЕРГЕТИЦІ
ім. Г.Є. ПУХОВА НАН УКРАЇНИ

МАТЕРІАЛИ
VII НАУКОВО-ПРАКТИЧНОЇ КОНФЕРЕНЦІЇ

БЕЗПЕКА ЕНЕРГЕТИКИ В ЕПОХУ ЦИФРОВОЇ ТРАНСФОРМАЦІЇ

20 листопада 2025 року

м. Київ

2025

Вельмишановний учасник _____

_____

Запрошуємо Вас прийняти участь в роботі VII науково-практичної конференції «Безпека енергетики в епоху цифрової трансформації», яка буде проходити 20 листопада 2025 року в Інституті проблем моделювання в енергетиці ім. Г.Є. Пухова Національної академії наук України (м. Київ).

ОРГАНІЗАТОРИ КОНФЕРЕНЦІЇ

Інститут проблем моделювання в енергетиці ім. Г.Є. Пухова НАН України (м. Київ)

ПРОГРАМНИЙ КОМІТЕТ

Мохор Володимир Володимирович
член-кореспондент НАН України, доктор технічних наук, професор, директор Інституту, голова програмного комітету

Чемерис Олександр Анатолійович
доктор технічних наук, професор,
заступник директора з наукової роботи

Артемчук Володимир Олександрвич
доктор технічних наук,
заступник директора з науково-організаційної роботи

Чьочь Вікторія Володимирівна
кандидат технічних наук,
заступник директора з науково-технічної роботи

ОРГАНІЗАЦІЙНИЙ КОМІТЕТ

Артемчук Володимир Олександрвич
доктор технічних наук,
заступник директора з науково-організаційної роботи

Клименко Тетяна Михайлівна
завідувачка науково-організаційного відділу

Цуркан Оксана Володимирівна
молодший наковий співробітник

Т.О. Євтухова, О.В. Новосельцев

ЗАСАДИ ОЦІНКИ БЕЗПЕКОВОЇ СТІЙКОСТІ ЛОКАЛЬНИХ ЕНЕРГОСИСТЕМ У РЕЖИМАХ АВТОНОМІЇ ТА ЧАСТКОВОЇ СИНХРОНІЗАЦІЇ З ОЕС УКРАЇНИ

У роботі проведено аналіз наукових публікацій і нормативно-правової-бази щодо оцінки безпекової стійкості енергосистем [1-5]. Виявлено прогалини, які для локальних енергосистем полягають у відсутності інтегрального індексу безпекової стійкості у режимах автономії/часткової синхронізації, браку науково-технічних рекомендацій для ‘м'якого перепідключення’ (кут/частота/напруга, SOC), відсутності оцінок кількісних зв’язків між кіберстійкістю (NERC/IEC/NIST) та технічною стійкістю. Сформульовано власну методику інтегральної оцінки для локальних енергетичних систем у режимах автономії та часткової синхронізації. Методика базується на узагальненому індексі S_{sec}, що об’єднує технічну, кібернетичну та організаційну стійкість у єдину метрику для режимів автономії/часткової синхронізації та включає коефіцієнт згладженості потужності ψ(t) і критерії ‘м'якого перепідключення’, які відображають динаміку взаємодії підсистем і оцінюють якість локальної генерації.

Сумісне функціонування традиційних (ТЕС, ГЕС, АЕС) і самодостатніх розподілених джерел (СЕС, ВЕС, ВДЕ-комплекси з накопичувачами) у роботі розглядається як інтегрована система систем ((System-of-Systems), у якій кожна підсистема забезпечує власну стійкість, а також роботу в спільному режимі з об’єднаною енергосистемою (ОЕС) України. Методологічні засади запропонованого переходу до інтегрованої системи систем охоплюють:

- Ідентифікацію локальних зон генерації та споживання;
- Побудову цифрових профілів споживання та ВДЕ-виробництва електричної та теплової енергії;
- Синтез локальних моделей прогнозно-адаптивного керування для балансування системи;
- Економічну оптимізацію за критерієм мінімуму сумарних витрат:

$$C = \left(C_{capex} + C_{opex} + C_{env} - C_{flex}\right) \rightarrow min, \quad (1)$$

де: C_{capex} – капітальні витрати (будівництво, обладнання), C_{opex} – операційні витрати (обслуговування, персонал), C_{env} – екологічні витрати або штрафи за викиди, C_{flex} – доходи від ринку гнучкості;

- Оцінку стійкості системи до кібератак, фізичних загроз і збоїв;

- Пілотну інтеграцію самодостатніх ВДЕ-систем з ОЕС через механізми віртуальних електростанцій і торгівлі енергією між учасниками ринку безпосередньо один з одним;
- Визначення критерію самодостатності K_{ssuf}, який є ключовим аспектом оцінки безпекової стійкості сумісного функціонування традиційних і самодостатніх ВДЕ-систем в ОЕС України.

Критерій самодостатності K_{ssuf} кількісно відображає здатність регіональної або локальної енергосистеми (регіону, громади, домогосподарства) самостійно забезпечувати власні енергетичні потреби за рахунок локальних відновлюваних джерел і накопичувачів, без порушення стабільності параметрів електричної мережі (частоти, напруги, фазового кута). Він має інтегральний характер та враховує енергетичну, часову і якісну збалансованість виробництва, споживання й акумулювання енергії:

$$K_{ssuf} = \frac{E_{RES}(t)+E^{dis}_{BESS}(t)-E^{ch}_{BESS}(t)}{E_{load}(t)} \cdot \psi(t), \quad (2)$$

де: $E_{RES}(t)$ – вироблена енергія від ВДЕ (СЕС + ВЕС) за розрахунковий період, кВт·год; $E^{dis}_{BESS}(t)$ – енергія, віддана з накопичувачів (розряд), кВт·год; $E^{ch}_{BESS}(t)$ – енергія, витрачена на заряд акумуляторів, кВт·год; $E_{load}(t)$ – енергія, спожита системою, кВт·год; $\psi(t)$ – коефіцієнт стабільності (якісний параметр), який характеризує здатність системи підтримувати генерацію в допустимих межах

$$\psi(t) = 1 - \frac{1}{T}\int_0^T \left|\frac{dP_{stab}(t)}{dt}\right| \frac{1}{P_{nom}} dt, \quad (3)$$

де $P_{stab}(t)$ – стабілізована сумарна потужність системи; P_{nom} – номінальна потужність системи; T – період оцінювання (доба, тиждень, місяць); $\psi(t)$ зменшується, якщо у системі спостерігаються часті коливання генерації, тобто якість саморегулювання погіршується.

Критерій використовується: для планування енергетичної незалежності громад, де він дозволяє визначати частку ВДЕ, необхідну для переходу до автономного режиму; в енергетичних DataHub-системах в якості індикатора самозабезпеченості територіальної підсистеми; на ринках гнучкості, де дозволяє оцінювати, які регіони можуть виступати постачальниками балансуючих послуг; для стратегічного управління (Міненерго, НКРЕКП) як аналітичний показник у моніторингу самодостатності областей України.

Системно-узагальнена безпекова стійкість S_{sec} () визначається як здатність локальної енергетичної системи підтримувати стабільність основних електричних параметрів (напруга, частота, фаза), забезпечувати безперервне живлення критичних споживачів, протидіяти зовнішнім загрозам (технічним, кібернетичним, організаційним) та відновлюватися після збурень без втрати структурної цілісності та даних:

$$S_{sec} = w_T S_T + w_C S_C + w_O S_O, \quad (4)$$

де: S_T – технічна стійкість (фізичні властивості системи під час збурень); S_C – кіберстійкість (захищеність інформаційно-керуючого середовища); S_O – організаційна стійкість (готовність персоналу, процедур і протоколів до кризових сценаріїв); w_T, w_C, w_O – вагові коефіцієнти (залежно від типу системи, зазвичай 0,5, 0,3, 0,2).

Технічна стійкість за виразом (4) визначається через здатність енергетичної мікросистеми підтримувати параметри у допустимих межах відхилення частоти від номінального значення, відхилення напруги та зсуву фазового кута між вузлами. Для режиму автономії контроль частоти здійснюється за рахунок локального регулювання генерації (СЕС/ВЕС + BESS), а для режиму часткової синхронізації допускається обмежений обмін потужністю з ОЕС; контролюються кути фаз і частота. Система має бути здатна до ‘м'якого перепідключення’ – плавного переходу між ізольованим і синхронним режимами. Кіберстійкість визначається через показники захищеності комунікаційних і керуючих систем кількістю виявлених вразливостей у SCADA/IoT системах та середнім часом відновлення після кіберінциденту. Організаційна стійкість оцінюється за індексом готовності персоналу й процедур і визначається рівнем підготовки персоналу (% успішності навчань), ступенем формалізації процедур безпеки (наявність стандартів інформаційної безпеки, насамперед ISO 27001) та готовністю до кризового реагування (середній бал за тестами відновлення).

Висновок: Реалізація пропонованого методологічного підходу, визначеного за формулами (1)-(4), дозволить громадам:

- оцінювати їх готовність до автономного енергозабезпечення під час воєнного стану або надзвичайних ситуацій;
- створити реєстр критичних вузлів енергетичної безпеки;
- інтегрувати оцінки у національні DataHub-Energy платформи для централізованого моніторингу рівня безпеки;
- формалізувати положення державного стандарту енергетичної кібер- та технічної стійкості для локальних енергосистем.

1. ДСТУ ISO/IEC 27001:2023 (ISO/IEC 27001:2022, IDT). Інформаційна безпека, кібербезпека та захист конфіденційності. Системи керування інформаційною безпекою. Вимоги. https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=104398.
2. ENTSO-E. (2015). Network Code on Emergency and Restoration (NC ER). https://www.entsoe.eu/Documents/Network%20codes%20documents/NC%20ER/150325_ENTSO-E_NC%20ER_final.pdf.
3. Laura, L., Jenket, D., Thomas, D., Ericson, S., Cox, J., Grue, N. and Hotchkiss. E. (2023). Measuring and Valuing Resilience: A Literature Review for the Power Sector. Golden, CO: National Renewable Energy Laboratory. NREL/TP-5R00-87053. https://www.nrel.gov/docs/fy23osti/87053.pdf.

4. DOE. (2025). Evaluating the Reliability and Security of the U.S. Electric Grid. https://www.energy.gov/sites/default/files/2025-07/DOE%20Final%20EO%20Report.pdf.
5. Sean, E., Grue, N., Hotchkiss, E. and Brown, M. (2023). Applications of Measuring and Valuing Resilience in Energy Systems. Golden, CO: National Renewable Energy Laboratory. NREL/TP-5R00-83841. https://www.nrel.gov/docs/fy23osti/83841.pdf.

Є.В. Парус, І.В. Блінов

МОДЕЛІ ЕКОНОМІЧНОЇ ДИСПЕТЧЕРИЗАЦІЇ НА ДОБУ НАПЕРЕД ДЛЯ АКТИВНОГО СПОЖИВАЧА

Сьогодні українська електроенергетика розвивається у напрямку впровадження технологій розподіленої генерації [1] та технологій "розумних мереж" [2], зокрема мікромереж [3]. Це зумовило появу нового учасника роздрібного ринку електроенергії – активного споживача, який здійснює продаж електроенергії за механізмами самовиробництва [4]. Для активного споживача впроваджено спрощені механізми реєстрації діяльності без потреби отримання ліцензії на виробництво електроенергії. Технічні та режимні вимоги щодо підключення активного споживача до електроенергетичних систем визначаються у [5].

Технічні та економічні аспекти діяльності активного споживача широко висвітлені у наукових та науково-технічних публікаціях, наприклад, у [6], а особливості форми участі споживачів електричної енергії на роздрібному ринку, наприклад, у [7, 8]. Розвиток ринкових відносин на роздрібному ринку електричної енергії та поява активних споживачів обґрунтовує актуальність побудови моделей розв'язання задачі економічної диспетчеризації локальних енергетичних ресурсів активного споживача на добу наперед з метою формування оптимальних графіків купівлі та продажу електроенергії на роздрібному ринку.

Діяльність активного споживача на роздрібному ринку електроенергії узгоджується із бізнес-моделями «зниження витрат на постачання енергії для користувачів мікромережі» (бізнес-модель C за класифікацією [9]) та «оптимізація місцевих ресурсів для надання послуги електромережі» (бізнес-модель D за класифікацією [10]). Основні вимоги до експлуатації локальних енергетичних ресурсів досліджені у [11], а задач енергоменеджменту – у [12].

Математична модель для розв'язання задачі економічної диспетчеризації локальних енергетичних ресурсів активного споживача імітує режими власного недиспетчеризованого навантаження, інвертора (як основного засобу оперативного управління); сонячної електростанції (локальної недиспетчеризованої генерації); УЗЕ (основного засобу оптимізації балансів енергії в мікромережі) та приєднання до системи розподілу (балансуючий вузол для схеми електричних з'єднань та точка комерційного обліку для потоків імпорту/експорту електроенергії).

Ціль задачі економічної диспетчеризації для активного споживача визначає максимізацію вигоди як різницю між вартістю проданої та купленої електроенергії:

$$Max(GF_{\text{prof}}) = \sum_{h=1}^{24}\left(C_h^{\text{прод}} \cdot V_{\text{прод},h}^{\text{AC}} - C_h^{\text{куп}} \cdot V_{\text{куп},h}^{\text{AC}}\right) - \sum_s PF_s$$

де: $C_h^{\text{куп}}$, $C_h^{\text{прод}}$ – ціни відповідно купівлі та продажу електроенергії у електропостачальника в розрахунковий період h, (₴/кВт·год); $V_{\text{куп},h}^{\text{AC}}$, $V_{\text{прод},h}^{\text{AC}}$ – змінні оптимізації, обсяги відповідно купленої та проданої електроенергії в розрахунковий період h, (кВт·год); PF_s – штрафні функції для врахування додаткових не цінових критеріїв оптимізації.

Функції штрафів, за потреби, застосовуються з такими цілями:

– штраф за не використаний (обмежений) профіцит генерації СЕС для стимулювання процесів накопичення надлишків електроенергії;

– штраф для вирівнювання графіків заряджання/розряджання УЗЕ в години з однаковими ринковими цінами;

– штрафи для вирівнювання графіків імпорту в години з однаковими ринковими цінами та однаковими обсягами власного навантаження активного споживача;

– штрафи за одночасне заряджання/розряджання УЗЕ;

– штрафи за одночасні імпорт/експорт електроенергії.

Останні два види штрафних функцій реалізують обмеження потоку енергії лише в одному напрямку в окремий період. Підходи до формування таких штрафних функцій розглянуті у [13]. Альтернативний спосіб контролю потоків енергії з використанням системи бінарних змінних наведений у [14].

Для оптимізації додатково використовується система обмежень, якою визначаються: баланси енергії в мікромережі, контроль потоків енергії від СЕС, контроль потоків енергії від УЗЕ, контроль рівня заповнення накопичувача УЗЕ та контроль рентабельної експлуатації УЗЕ. Детальний опис системи обмежень висвітлено у [13, 14].

Запропонована імітаційна модель формує оптимальні графіки купівлі/продажу електричної енергії, а також графіки режимів установки зберігання енергії. Оптимальні за принципом раціональної поведінки учасника ринку електроенергії плани використання локальних енергетичних ресурсів дозволяють готувати економічно обґрунтовані рішення як на етапах проєктування локальної енергосистеми, так і при її експлуатації. Крім того, запропонована імітаційна модель надає інструментарій формування навчальної вибірки для навчання штучних нейронних мереж при побудові інтелектуальних систем управління локальними електроенергетичними об’єктами.

1. Про схвалення Стратегії розвитку розподіленої генерації на період до 2035 року і затвердження операційного плану заходів з її реалізації у 2024 - 2026 роках. Розпорядження Кабінету Міністрів України.18.07.2024 №713-р URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/713-2024-%D1%80#Text.

2. Концепція впровадження “розумних мереж” в Україні до 2035 року. Розпорядження Кабінету Міністрів України 14.10.2022 № 908-р. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/908-2022-%D1%80#Text .
3. Блінов І.В. Розвиток розподіленої енергетики в Україні з використанням технологій мікромереж (за матеріалами доповіді на засіданні Президії НАН України 5 березня 2025 р.). *Вісник НАН України*. 2025. № 5. С. 35—44. DOI: https://doi.org/10.15407/visn2025.05.035.
4. Правила роздрібного ринку електричної енергії. Постанова НКРЕКП 14.03.2018 № 312. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/v0312874-18#Text.
5. Кодекс систем розподілу. Постанова НКРЕКП 14.03.2018 № 310. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/en/v0310874-18?lang=uk#Text.
6. Денисюк С.П., Таргонський В.А., Артем’єв М.В. "Локальні електроенергетичні системи з активним споживачем: методи побудови та алгоритми їх функціонування." *Науковий журнал «Енергетика: економіка, технології, екологія»* 3 (2018): 7-22.
7. Блінов І.В., Парус Є.В., Мірошник В.О., Шиманюк П.В., Сичова В.В. Модель оцінки доцільності переходу промислових споживачів до погодинного обліку електричної енергії на роздрібному ринку. Енергетика: економіка, технології, екологія. 2021. №1. С. 88-97. DOI: https://doi.org/10.20535/1813-5420.1.2021.242186.
8. Блінов І.В., Парус Є.В., Клименко О.Г., Клюзко О.І. Спосіб порівняльних оцінок комерційних пропозицій електропостачальників для споживачів без погодинного обліку електричної енергії. Енергетика: економіка, технології, екологія. 2023. № 2 (73). С. 36-42. DOI: https://doi.org/10.20535/1813-5420.3.2023.289654.
9. IEC TS 62898-1: 2017+AMD 1: 2023 Microgrids – Part 1: Guidelines for microgrid projects planning and specification. 2023. 78 p.
10. IEC TS 62898-2: 2018+AMD 1: 2023 Microgrids - Part 2: Guidelines for operation. 2018. 38 p.
11. Блінов, І.В., С.О. Палачов, Є.В. Парус, О.Г. Клименко. «Сценарії використання мікромереж згідно з міжнародними стандартами». Праці Інституту електродинаміки Національної академії наук України, вип. 70, Квітень 2025, с. 014, https://doi.org/10.15407/publishing2025.70.014.
12. Блінов, І.В., С.О. Палачов, Є.В. Парус, О.Г. Клименко. «Структура та функції систем енергоменеджменту мікромережі в умовах підключення до системи розподілу згідно до вимог міжнародних стандартів». Праці Інституту електродинаміки Національної академії наук України, вип. 71, Серпень 2025, с. 15 – 27, DOI: https://prc.ied.org.ua/index.php/proceedings/article/view/404.
13. Блінов І., Парус Є., Шиманюк П., Ворушило А. Модель оптимізації функціонування мікромережі з СЕС та установкою зберігання енергії. *Технічна електродинаміка*. 2024. № 5. С. 69-78 DOI: https://doi.org/10.15407/techned2024.05.069.
14. Парус Є.В., Блінов І.В. Оптимізація використання доступних енергоресурсів мікромережі за умов підтримки готовності до ізольованого режиму. *Технічна електродинаміка*. 2025. №5. С. 56-69. DOI: https://doi.org/10.15407/techned2025.05.056.

В.М. Горбачук, Д.І. Ніколенко, С.П. Осипенко, О.С. Павлюк, В.М. Погребна

ПОСЛУГИ БАЛАНСУЮЧИХ РИНКІВ ЕНЕРГІЇ

В Європі балансуючі ринки намагаються підтримувати частоту електромереж у межах 50 герц (Гц): незначні відхилення близько 0,2 Гц можуть вести до потенційних перебоїв. Щоб підтримувати частоту в межах встановленого діапазону, використовується балансуюча енергія.

Балансуюча енергія – це електрична енергія, що використовується оператором системи передачі (TSO) для збалансування реальних обсягів виробництва та споживання електроенергії, а також для врегулювання системних обмежень. Балансуючу енергію продають через балансуючі ринки для забезпечення стабільного та надійного постачання електроенергії споживачам в режимі реального часу незалежно від флуктуацій ринків.

Балансуюча енергія призначається для коригування різниці між плановими та фактичними показниками споживання і виробництва електроенергії, а забезпечується TSO та так званими балансуючими групами з учасників ринку. Балансуюча енергія купується та продається на спеціальному балансуючому ринку, який є важливою частиною системи управління енергосистемою.

Балансуючі ринки класифікують такі типи: 1) резерв стримування частоти (Frequency Containment Reserve (FCR)) – первинний резерв регулювання, який реагує на відхилення протягом 10 секунд; 2) автоматичний резерв відновлення частоти (automatic Frequency Restoration Reserve (aFFR)) – вторинний механізм регулювання частоти, який автоматично активується протягом 30 секунд; 3) ручний резерв відновлення частоти (manual Frequency Restoration Reserve (mFRR)) – третинний резерв регулювання частоти, який відновлює первинний та вторинний резерв регулювання для протидії вузьким місцям у мережі передачі.

Балансуючі послуги (balancing services) електромереж забезпечують баланс між виробництвом і споживанням електроенергії в реальному часі, а також забезпечують функціонування балансуючих ринків електроенергії через координацію роботи учасників ринку (виробників, імпортерів, споживачів) з метою підтримання стабільності енергосистеми.

Основні функції провайдерів (учасників) балансуючих послуг:

забезпечення балансу з досягненням головної мети – збалансувати обсяги виробництва та споживання електроенергії в певний момент часу, щоб уникати перенавантажень чи нестачі потужності в мережі;

робота на балансуючих ринках – специфічних секторах енергоринків, де відбувається купівля та продаж електроенергії для забезпечення балансу в реальному часі;

створення балансуючих груп для координації дій учасників ринку та їх об’єднання на основі договорів (контрактів);

диспетчеризація, за яку відповідає TSO з урахуванням управління потоками електроенергії та координації роботи енергетичних об’єктів;

технічне обслуговування та розвиток систем електромереж, включаючи міждержавні лінії передачі.

Балансуванням займаються:

TSO – юридична особа, яка відповідає за експлуатацію та диспетчеризацію системи передачі електроенергії (зокрема «Укренерго»);

учасники ринку – виробники електроенергії, імпортери, експортери та споживачі, які беруть участь у балансуючому ринку;

регулятор, який контролює діяльність учасників ринку, – Національна комісія, що здійснює державне регулювання у сферах енергетики та комунальних послуг (НКРЕКП).

Балансуючі послуги вирівнюють відхилення частоти в електромережі, щоб гарантувати постійне узгодження споживання та виробництва електроенергії. При відхиленнях частоти (зокрема відключенні електроенергії на електростанції) використовується резервна потужність для відновлення балансу між пропозицією та попитом протягом кількох секунд.

Операційний резерв (Operating Reserve) підтримки частоти (РПЧ) – це автоматичний резерв електроенергії, який миттєво реагує на зміни частоти в енергосистемі, щоб забезпечувати її синхронну роботу. Цей вид резерву активується протягом секунд і підтримує стабільність частоти в межах синхронної зони енергосистем. РПЧ автоматично вмикається у відповідь на раптову зміну балансу між виробництвом і споживанням електроенергії, підтримує синхронізацію – синхронну роботу енергосистем (наприклад, енергосистеми України та ENTSO-E), регулює частоту – надає одну з допоміжних послуг, яка допомагає підтримувати задану частоту струму (зазвичай 50 Гц) в мережі. Коли зростає навантаження або зникає частина генерації, генератори сповільнюються, частота спадає, то впродовж кількох секунд активується РПЧ, автоматично збільшуючи потужність для стабілізації частоти і діючи до 15 хвилин, до ввімкнення вторинного резерву.

Операційний резерв, який використовується для підтримки частоти, поділяється на категорії первинного резерву, вторинного резерву і третинного резерву, характерні проміжком часу для своєї активації та тривалістю своєї активації. Первинний та вторинний резерви регулювання частоти – це механізми, що використовуються енергосистемами для забезпечення стабільності частоти та балансування між виробництвом і споживанням електроенергії.

1) FCR – це первинний резерв регулювання, який автоматично та швидко (протягом проміжку часу менше 10 секунд) реагує на раптові (невеликі) відхилення частоти (внаслідок зміни виробництва чи споживання (навантаження)) і забезпечує короткочасний сплеск (відгук) потужності (зазвичай тривалістю до 15 хвилин) енергоблоків (гідро-, теплові або атомні електростанції), які автоматично та швидко (протягом мілісекунд або секунд) реагують на зміни частоти, збільшуючи або зменшуючи свою потужність відповідно до заздалегідь встановлених параметрів. FCR – це основна

послуга в енергосистемі, призначена для швидкого реагування (протягом кількох секунд) на зміни частоти, щоб підтримувати стабільність мережі та досягати головної мети – забезпечувати заданий (номінальний) рівень (діапазон) значень частоти енергосистеми й уникати надмірних відхилень (значень мір ризику). Ця послуга допомагає підтримувати баланс між виробництвом і споживанням електроенергії в режимі реального часу для підтримки стабільності енергосистеми шляхом швидкого реагування на зміни частоти в електромережі.

2) Вторинний резерв – це резерв з диспетчерським типом регулювання, який активується пізніше первинного резерву, але є масштабнішим і тривалішим у підтримці балансу. Мета вторинного резерву – забезпечувати стабільність системи протягом тривалішого періоду після відпрацювання первинного резерву. Вторинний резерв необхідний для повного відновлення балансу й усунення вторинних відхилень частоти. Принцип роботи вторинного резерву полягає у тому, що диспетчерський центр надсилає команди на електростанції для активації резервних потужностей (генеруючі потужності, зокрема потужності, які можуть швидко зменшуватися (наприклад, потужності, підключені до мережі, але не на повну потужність своїх енергоблоків)). Якщо після швидкої реакції первинного резерву частота залишається не повністю стабілізованою, то диспетчер направляє команди до інших електростанцій для запуску резервних генераторів або зміни їх потужностей, щоб повертати частоту мережі до нормального рівня (50 Гц).

aFFR – це механізм вторинного регулювання частоти, який автоматично активується протягом 30 секунд, щоб забезпечувати короткочасне живлення до 12,5 хвилин.

3) mFRR – це механізм третинного регулювання частоти, який відновлює первинні та вторинні резерви регулювання частоти для управління вузькими місцями в мережі передачі. Оскільки цей механізм активується операторами мережі здебільшого в ручному режимі, то має більший проміжок часу для своєї активації, але має більшу тривалість своєї активації, забезпечуючи живлення до кількох годин.

У контексті небалансу та протидії виникаючим небалансам, вирізняємо період часу доступності послуг балансування і типи FCR.

FCR призначений для автоматичного реагування на будь-які зміни частоти мережі протягом коротких проміжків часу. Оскільки оптимальна частота мережі в Європі становить 50 Гц, то дотримання цього заданого значення частоти стає вирішальним фактором для підтримки стабільності мережі. Основними типами FCR є резерв стримування частоти для нормальної роботи (Frequency Containment Reserve for Normal Operation (FCR-N)), спрямований на підтримку частоти мережі в діапазоні від 49,9 до 50,1 Гц, та резерв стримування частоти до збурень (Frequency Containment Reserve for Disturbances (FCR-D)), доступний лише в нордичних (скандинавських) країнах спеціальний варіант, який реагує, коли частота виходить за межі стандартного діапазону від 49,5 до 50,5 Гц.

Механізм FCR-N має бути придатним до збільшення чи зменшення виробництва електроенергії. Механізм FCR-D поділяється на окремі частини для регулювання збільшення чи зменшення, а також поділяється на динамічні та статичні продукти. Динамічний FCR-D може регулюватися безперервно та швидко виявляти резерви при менших відхиленнях, а статичний FCR-D не може регулюватися безперервно і потребує більше часу своєї активації.

Енергомережі залежать від інерції своїх складових: інерція енергомережі походить від її тисяч синхронізованих генераторів, що дають частоту 50 Гц. Небаланс між виробництвом і споживанням прискорює або уповільнює роботу цих генераторів, дещо змінюючи частоту мережі.

Разом з іншими послугами балансування мережі, FCR працює як механізм безпеки для підтримки частоти мережі, протидіючи короткостроковим небалансам між споживанням та генерацією енергії. Така цільова підтримка має вирішальне значення для гарантування безпеки мережі. Якщо електростанції на викопному паливі дають стабільніше та передбачуваніше енергопостачання, то відновлювані джерела енергії є мінливішими та переривчастими (intermittent). Раптові відхилення у виробництві можуть вести до змін частоти, які треба врівноважувати: наприклад: якщо вітер раптово вщухає, то вітрові турбіни на великій площі генеруватимуть менше електроенергії, а обсяг електроенергії, що подається в мережу, стане меншим обсягу, що споживається, знижуючи частоту в мережі. Подібні флуктуації можуть вести до нестабільності, якщо їх швидко не компенсувати. Саме тут вступають у дію резерви стримування частоти, особливо швидкі резерви, які можуть формуватися з акумуляторних накопичувачів, гідроакумулюючих електростанцій, похідних технологій на традиційних електростанціях тощо.

Хоча традиційно резерви стримування частоти забезпечувалися великими електростанціями, перехід на відновлювану енергію означає, що використання гнучкості малих активів стає все важливішим та ефективнішим. Наприклад, агрегування гнучкості житлових систем акумуляторного накопичення енергії допомагає створювати диспетчеризований блок потужності, який може швидко компенсувати відхилення частоти. Основною перевагою тут є використання гнучкості наявних малих потужностей для FCR: кількість житлових батарей зростає експоненціально завдяки технологічній сингулярності та численним перевагам, які вони надають домогосподарствам.

Ключовими кроками тут є агрегація та дезагрегація. Агрегація передбачає об’єднання та активацію потенційної потужності понад 1000 накопичувачів в єдиний диспетчеризований блок. Дезагрегація означає розділення активованої гнучкості на фактичні сигнали керування для окремих активів, щоб їх можна було використовувати для локальних цілей, зокрема для оптимізації самозабезпечення конкретних житлових об’єктів.

В.З. Чіхладзе

CONCEPTUAL FRAMEWORK FOR BUILDING DECENTRALIZED ELECTRICITY MARKETS BASED ON DERIVATIVE INSTRUMENTS USING BLOCKCHAIN TECHNOLOGY

У роботі запропоновано блокчейн-архітектуру для децентралізованої торгівлі електроенергією, що токенізує погодинні права на постачання та майбутні доходи виробників у вигляді передаваних цифрових активів. Система замінює централізовану інфраструктуру клірингу та матчінгу прозорими смартконтрактами, забезпечуючи програмованість, аудитованість та відсутність єдиного пункту відмови.

Ключовою ідеєю є представлення заявок на купівлю/продаж у вигляді ERC-1155 токенів, де tokenId кодує часовий слот і ціну. Це дозволяє точно зіставляти заявки між годинними або субгодинними інтервалами та гарантує прив'язку кожної заявки до конкретного періоду постачання. Спеціальний смартконтракт Matcher спалює зіставлені ордери, депонує кошти та випускає три активи: (1) NFT-опціон із зафіксованими умовами постачання; (2) Principal Token (PT), який надає споживачеві право отримати певний обсяг електроенергії у визначеному слоті; (3) Yield Token (YT), що відображає майбутній дохід виробника.

Адаптуючи Pendle-модель поділу активу на principal/yield до електроенергетики, ми вводимо детермінований лінійно зростаючий дисконтований викуп YT у межах слоту. Це забезпечує прогнозованість та програмованість механізму. Для підвищення ліквідності запропоновано IndexYT — резервний токен, який акумулює YT із різних слотів. Його формула емісії гарантує, що пропозиція зростає повільніше за ліквідність, створюючи внутрішню премію та перетворюючи IndexYT на дохідний фінансовий інструмент.

Запропонований підхід покращує ціновідкриття, підтримує гнучкий трансфер ризиків та дозволяє оператору системи розподілу застосовувати політики через oracle-рівень. Архітектура демонструє можливість перетворення прав на електропостачання на ліквідні фінансові інструменти у повністю децентралізованому ринку.

1. Stoft, S. (2002). Power System Economics: Designing Markets for Electricity. IEEE Press & Wiley-Interscience.
2. Andoni, M., Robu, V., Flynn, D., Abram, S., Geach, D., Jenkins, D., McCallum, P., & Peacock, A. (2019). Blockchain technology in the energy sector: A systematic review of challenges and opportunities. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 100, 143-174. https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.10.014.

3. Nakamoto, S. (2008). Bitcoin: A Peer-to-Peer Electronic Cash System. Retrieved from https://bitcoin.org/bitcoin.pdf.
4. Sféra JSC (2021). Technical specification for market participants. Version 1.3. Software information complex for organizing trading XMtrade®|PXS. Bratislava: Sféra a.s.
5. Pendle Finance Documentation. https://docs.pendle.finance.
6. Buterin, V., "A next-generation smart contract and decentralized application platform," Ethereum White Paper, 2013.
7. Ethereum Improvement Proposal 20 (ERC-20): Token Standard. [Available at: https://eips.ethereum.org/EIPS/eip-20.
8. Ethereum Improvement Proposal 721 (ERC-721): Non-Fungible Token Standard. [Electronic resource] https://eips.ethereum.org/EIPS/eip-721.
9. Ethereum Improvement Proposal 1155 (ERC-1155): Multi Token Standard. [Electronic resource] https://eips.ethereum.org/EIPS/eip-1155.
10. Rules of the day-ahead and intraday market, approved by the Resolution of the National Commission for State Regulation of Energy and Utilities of 14.03.2018 No. 308 (as amended).
11. International REC Standard Foundation. Energy Attribute Certificates (EACs). [Electronic resource]. Access mode: https://www.irecstandard.org/eacs.

В.О. Мірошник, В.В. Сичова

КОРОТКОСТРОКОВЕ ПРОГНОЗУВАННЯ СПОЖИВАННЯ ТА ГЕНЕРАЦІЇ ВІРТУАЛЬНИХ ОБ'ЄДНАНЬ: ОГЛЯД ПІДХОДІВ

Сучасна лібералізація оптового ринку електричної енергії України, розвиток концепції локальних ринків та агрегаторів і балансуючих груп роблять точні погодинні прогнози на горизонті 1–7 діб ключовим інструментом забезпечення конкурентоспроможної участі на ринку «на добу наперед» (РДН), внутрішньодобовому ринку (ВДР) та балансуючому ринку. Для локальних систем, описаних, зокрема, в роботі [1], де агрегатор оптимізує графіки навантаження локальної мікромережі з дизель-генераторами та програмами керування попитом, необхідність якісних прогнозів графіків споживання прямо пов'язана з мінімізацією паливних витрат та витрат на електроенергію для покриття попиту. Для операторів розподільчих мереж та системного оператора точність прогнозів сумарних навантажень і втрат безпосередньо впливає на вартість небалансів і закупівель енергії для компенсації технічних втрат, як показано у [2]. У цьому контексті для віртуальних об'єднань учасників ринку необхідним є обгрунтований вибір структури прогнозної моделі за рівнем агрегації даних.

Узагальнюючи літературу, доцільно розглядати три підходи до короткострокового прогнозування нетто-потужності віртуального об'єднання. Перший підхід – пряме прогнозування сальдованого (агрегованого) часового ряду нетто-потужності об'єднання. Другий – часткова агрегація, за якої окремо прогнозуються сумарне споживання та сумарна генерація (в тому числі за технологічними групами ВДЕ), після чого формується нетто-прогноз. Третій – повністю дезагреговане (bottom-up) прогнозування, коли моделі будуються для окремих споживачів і електростанцій або однорідних кластерів, а сумарна потужність утворюється шляхом агрегації індивідуальних прогнозів.

Пряме прогнозування агрегованого ряду історично є базовим для задач короткострокового прогнозування сумарних навантажень енергосистем. В [3] автори розділяють сумарне навантаження на комунально-побутову та технологічну складові й показують, що для технологічної складової агреговане прогнозування сумарного навантаження енергоємних підприємств за допомогою інтегрованих авторегресійних моделей Бокса–Дженкінса (ARIMA) забезпечує стабільніші результати порівняно з прогнозуванням окремих підприємств. Це узгоджується з загальними висновками робіт, присвячених впливу рівня агрегації на точність прогнозування. В [4] показано, що для груп домогосподарств зростання розміру групи понад 20–50 споживачів призводить до суттєвого зменшення MAPE для агрегованого навантаження, в [5–7] на даних різних енергосистем продемонстровано різке зростання стабільності (зменшення дисперсії похибок) із підвищенням рівня агрегації. Статистичні моделі типу SARIMA, ARIMAX, методи експоненційного згладжування, а також прості моделі

машинного навчання (градієнтний бустинг, випадкові ліси) добре працюють на агрегованому рівні, де ряд має виражену добову й тижневу періодичність, відносно невелику варіативність та стабільні автокореляційні властивості [3, 5]. Для агрегованих рядів також найпростіше отримувати оцінки невизначеності – класичні прогнозні інтервали ARIMA, байєсівські часові моделі, квантільна регресія дають добре інтерпретовані довірчі інтервали для сумарного навантаження, що особливо важливо при оцінюванні невизначеності для великих об'єднань.

Недоліком повної агрегації є втрата детальної інформації про структуру об'єднання. Як показано в [5], нетто-навантаження, що є різницею між сумарним попитом і сумарною генерацією ВДЕ, має складний характер залежності від метеорологічних та поведінкових факторів; при прямому прогнозуванні такого ряду моделі не можуть повною мірою використати окремі ознаки для споживання та генерації, що призводить до гіршої точності порівняно з підходами, де ці компоненти прогнозуються роздільно. У випадку віртуальної електростанції або локального ринку це означає, що пряме прогнозування лише сальдованої потужності не дозволяє оптимізувати внутрішні режими розосереджених джерел енергії, накопичувачів і програм керування попитом.

Часткова агрегація – коли окремо прогнозуються сумарне споживання і сумарна генерація (або окремі технологічні групи генерації) – у низці робіт показана як компроміс, що дає кращу точність, ніж пряме прогнозування сальдованого ряду, та водночас уникає різкого зростання складності, характерного для повністю bottom-up підходу. В [5] за результатами багатьох сценаріїв саме частково агрегований підхід забезпечив найменшу сумарну похибку (за RMSE і CRPS), перевищуючи за точністю як чисто агрегований, так і повністю дезагрегований підходи. Це узгоджується з висновками [4], що для середніх рівнів агрегації добре налаштовані моделі машинного навчання (градієнтний бустинг, випадкові ліси, підтримувальні вектори) дають найбільший виграш у точності.

Широкий спектр задач, в яких можуть використовуватись результати прогнозування при частковій агрегації часових рядів наведено в [2], Автори розглянули два концептуальні підходи: 1) пряме прогнозування агрегованого часового ряду сумарних втрат у мережі; 2) окреме прогнозування навантажень у вузлах схеми з подальшим обчисленням втрат на основі розрахунків режиму мережі. Для обох підходів було застосовано нейронні мережі глибокого навчання (LSTM, eResNet) з попереднім виявленням й заміною аномалій. Другий підхід, який за структурою відповідає частковій агрегації (окремі компоненти – вузлові навантаження, потім агреговані втрати), забезпечив істотно меншу похибку. Така побудова дозволяє природним чином враховувати зміну топології мережі на етапі розрахунку режиму без перенавчання моделей прогнозування навантажень, що є безпосередньою аналогією до задач VPP, де змінюється конфігурація об'єднання розосереджених джерел енергії.

Таким чином, часткова агрегація є природною для сценаріїв, коли для віртуальної електростанції або локального ринку важливо окремо моделювати поведінку сумарного споживання (залежного від календаря, цін, поведінкових факторів) і сумарної генерації (залежної від метеоумов, технічних характеристик установок), а також втрат і технічних обмежень мережі. На цьому рівні агрегації особливо ефективними є глибинні нейронні мережі (LSTM, GRU, CNN–LSTM, eResNet) та ансамблеві методи (градієнтний бустинг, багатомодельні ансамблі з динамічним зважуванням), які здатні відтворювати складні нелінійні залежності та багатомасштабну сезонність [2,4–5].

Повністю дезагрегований підхід (bottom-up), за якого прогнозуються окремі споживачі, електростанції або вузли, дозволяє максимально використати особливості їх поведінки. Недоліками такого підходу є значна складність, як з точки зору необхідних обчислювальних ресурсів так, і побудови великої кількості моделей. Обмеженість bottom-up підходу за великої кількості об’єктів показано в [8]. За реалістичних обмежень на кластеризацію даних bottom-up-прогнозування може давати гіршу точність, ніж модель агрегованого часового ряду. При цьому використання кластеризації та ієрархічних схем дозволяє частково зменшити похибки, однак значно ускладнює архітектуру системи прогнозування [9].

Для віртуальних об’єднань bottom-up підхід є природним там, де кількість учасників відносно невелика (локальні ринки, мікромережі, агрегатори) і де важлива поведінка кожного окремого об’єкта, наприклад для оптимізації режимів окремих накопичувачів, генераторів чи реалізації програм керування попитом. Однак оцінювання невизначеності в такому підході є найскладнішим, оскільки потребує моделювання спільного розподілу похибок великої кількості часових рядів; просте припущення незалежності може суттєво недооцінює ризик похибки нетто-навантаження.

Оцінювання невизначеності прогнозів є принципово важливим, оскільки саме від характеристик розподілу похибок (а не лише від середньої MAPE) залежать оптимальні стратегії участі VPP у РДН/ВДР та балансуючому ринку. Для агрегованого підходу побудова імовнісних прогнозів технічно найпростіша: низка робіт демонструє успішне застосування Баєсівських моделей, квантільного градієнтного бустингу та bootstrap-ансамблів для отримання довірчих інтервалів та квантильних прогнозів для сумарного навантаження. Частково агрегований підхід потребує спільного моделювання невизначеності окремих компонент (споживання, генерація, втрати), проте розмірність задачі все ще прийнятна. У bottom-up підході повноцінна оцінка невизначеності потребує ієрархічних байєсівських моделей, багатомірних функцій розподілу або великих ансамблів сценаріїв; на практиці це часто замінюється спрощеними схемами, що знижують достовірність оцінки невизначеності прогнозу. Отже, з точки зору поєднання точності прогнозу, складності реалізації та можливостей оцінювання невизначеності найбільш збалансованим для віртуальних

об’єднань виглядає підхід часткової агрегації, що підтверджується як зарубіжними дослідженнями [2,4–7], так і українськими роботами, орієнтованими на прогнозування технологічної складової навантаження та втрат [2–3].

Таким чином, пряме агреговане прогнозування є оптимальним для великих об’єднань та задач ринкової взаємодії, часткова агрегація забезпечує баланс між точністю та фізичною інтерпретованістю, а дезагреговане прогнозування залишається незамінним у задачах локального аналізу, управління розосередженими джерелами та керуванні попитом.

1. Бєлоха, Г. С., & Сичова, В. В. (2023). Оптимізація графіків електричного навантаження агрегатором у локальних електроенергетичних системах. *Праці Інституту електродинаміки НАН України*, 66, 84–89. https://doi.org/10.15407/publishing2023.66.084.
2. Blinov, I., Radziukynas, V., Shymaniuk, P., Dyczko, A., Stecuła, K., Sychova, V., Miroshnyk, V., & Dychkovskyi, R. (2025). Smart management of energy losses in distribution networks using deep neural networks. *Energies, 18*, 3156. https://doi.org/10.3390/en18123156.
3. Черненко, П. О., Мартинюк, О. В., & Мірошник, В. О. (2016). Моделювання та короткострокове прогнозування технологічної складової електричного навантаження обласної енергосистеми. *Технічна електродинаміка*, (4), 68–70. https://doi.org/10.15407/techned2016.04.068.
4. Peñaloza, A. A., Leborgne, R. C., & Balbinot, A. (2022). Comparative analysis of residential load forecasting with different levels of aggregation. *Engineering Proceedings, 18*(1), 29. https://doi.org/10.3390/engproc2022018029.
5. Beichter, M., Phipps, K., Frysztacki, M. M., Mikut, R., Hagenmeyer, V., & Ludwig, N. (2022). Net load forecasting using different aggregation levels. *Energy Informatics, 5*(S1), 19. https://doi.org/10.1186/s42162-022-00213-8.
6. Peng, Y., Wang, Y., Lu, X., Li, H., Shi, D., Wang, Z., & Li, J. (2019). Short-term load forecasting at different aggregation levels with predictability analysis. In *2019 IEEE Innovative Smart Grid Technologies – Asia (ISGT Asia)* (pp. 3385–3390). https://doi.org/10.1109/ISGT-Asia.2019.8881343.
7. Sevlian, R., & Rajagopal, R. (2017). Short term electricity load forecasting on varying levels of aggregation. *arXiv preprint*, arXiv:1404.0058.
8. Anand, H., Nateghi, R., & Alemazkoor, N. (2023). Bottom-up forecasting: Applications and limitations in load forecasting using smart-meter data. *Data-Centric Engineering, 4*, e14. https://doi.org/10.1017/dce.2023.10.
9. Bandyopadhyay, S., Ganu, T., Khadilkar, H., & Arya, V. (2015). Individual and aggregate electrical load forecasting: One for all and all for one. In *Proceedings of the 6th International Conference on Future Energy Systems (e-Energy ’15)* (pp. 257–267). https://doi.org/10.1145/2768510.2768539.

М.Ю. Гнатюк

ГРАФІЧНЕ СЕРЕДОВИЩЕ ДЛЯ ОЦІНЮВАННЯ НАДІЙНОСТІ ЕЛЕКТРИЧНИХ СИСТЕМ В ЗАДАЧАХ ОПТИМІЗАЦІЇ ЇХ РЕЖИМІВ

Дана робота присвячена формуванню передумов для підвищення ефективності оцінювання надійності електричних систем в задачах оптимального керування їх режимами, а також вдосконалення методу формування законів оптимального керування потоками потужності в ЕЕС з урахуванням їх надійності.

Ключові слова: електрична система, розподільний пристрій, заступна схема, графічне середовище, структурна надійність, оптимальний режим, керування.

Ефективне розв'язання задачі оптимального керування нормальними режимами електричних систем (ЕС) вимагає вдосконалення принципів та підходів до зниження технологічних витрат електроенергії за рахунок наявних засобів регулювання. Проблему підвищення ефективності керування можна розглядати в двох аспектах: моделювання керованих процесів та програмно-інформаційне забезпечення. У даній роботі подано результати досліджень з вдосконалення програмних засобів для керування нормальними режимами ЕС.

Задача оптимізації оперативного керування нормальними режимами ЕС може бути подана як задача мінімізації втрат потужності на окремому часовому

$$\delta P = f(x,u) \Rightarrow \min \qquad (1)$$

$$\text{за умов } V(x,u) = 0\,;\ x \in \mathbf{M}_x;\ u \in \mathbf{M}_u\ ,$$

де V(x, u) – рівняння зв'язку; $\mathbf{M_x}$ – область допустимих значень залежних змінних x; $\mathbf{M_u}$ – область допустимих значень незалежних змінних та змінних керування u.

У сучасних умовах під час розв'язання задач керування ЕС обов'язково мають враховуватися збитки, пов'язані з недовідпуском електроенергії або невідповідністю графіків її транспортування заданим згідно договору. Отже, для кожної сукупності керувальних впливів, що забезпечують наближення стану ЕС до оптимального, необхідно розглядати імовірні відмови, які можуть призводити до втрати генерування електростанцій, відключення ліній зв'язку, трансформаторних зв'язків тощо, розраховувати частоту аварійних відключень, тривалість перерв електропостачання та їх наслідки для споживачів й експлуатації ЕС.

Методи розрахунку надійності електроустановок поділяють на логіко-ймовірностні, логіко-аналітичні, таблично-логічні, методи розрахункових

груп та інші. Кожна група методів має свої переваги і недоліки і загально прийнятого методу на сьогодні не існує [1]. Однак, для розрахунку надійності головних схем електричних станцій і підстанцій, як найбільш відповідальних електроустановок, знайшов широке застосування таблично-логічний метод [2]. Аналіз надійності таблично-логічним методом передбачає почергову цілеспрямовану імітацію відмов елементів електроустановки з виявленням їх наслідків в нормальному та ремонтному станах. Він застосовується в тих випадках, коли розмаїтість відмов розглянутої системи є великою і до початку дослідження неможливо визначити, які види відмов і аварій можуть виникнути за тих або інших збурень. Попри всі переваги, недоліком такого підходу є значна кількість логічних та обчислювальних операцій, складність ідентифікації частково-робочих станів та їх наслідків, зокрема, переліку відключених елементів та тривалості їх відключення. Тому для оцінювання надійності ЕС на основі таблично-логічного методу було розроблено програмне графічне середовище.

Надійність ЕС у заданому режимі оцінюється імовірним обсягом збитків, що зумовлені недовідпуском електроенергії. Імовіний недовідпуск електроенергії визначаються виходячи зі схеми ЕС та показників надійності основного обладнання. Кожна відмова або певний результат її накладання на ремонтний стан обладнання розглядається як незалежні події і аналізується окремо. Для таких станів формують схему транспортування електроенергії та визначають її недовідпуск, що пов'язаний з технічними обмеженнями елементів ЕС, які залишилися у робочому стані:

$$\Delta W_{EC} = \sum P_{ij} \frac{\omega_{ij} T_{ij}}{8760} \tag{2}$$

де P_{ij} – максимальне обмеження потужності, що трапляється через накладання відмови і на ремонтний стан j; ω_{ij} – статистична кількість таких співпадінь протягом року; T_{ij} – імовірна тривалість такого співпадіння негативних факторів.

Для електростанцій, які працюють на місцеве навантаження або для системних підстанцій аварійна ситуація в розподільному пристрої може призводити до порушення електропостачання споживачів. Для заданого споживача недовідпуск електроенергії можна оцінити так:

$$\Delta W_{cn} = P_{\max} \sum \frac{\omega_{ij} T_{ij}}{8760} \tag{3}$$

де P_{max} – максимальна потужність заданого споживача протягом досліджуваного періоду року.

Для реалізації алгоритму локалізації аварії, а також визначення ймовірності її виникнення, використовувався рекурсивний підхід [3]. Основне обладнання ЕС поділяється на контрольовані та проміжні елементи. Підпрограма імітації аварії для кожного контрольованого елемента

(наприклад вимикача) в свою чергу запускає підпрограму імітації аварій проміжних суміжних елементів, доки наступним суміжним елементом не виявиться контрольований елемент. Далі визначається ймовірність відключення певної ділянки електромереж з урахуванням надійності усіх її елементі.

Об'єктом аналізу у даній роботі є електрична система, що має велику кількість елементів основного обладнання та зв'язків між ними. Для зручного і швидкого формування розрахункової моделі ЕС було розроблене графічне середовище. Воно забезпечує користувача елементами інтерфейсу для побудови схеми ЕС використовуючи зрозумілі образи та прийоми, а також для відображення схеми на двох ієрархічних рівнях: укрупненого відображення ЕС та детального відображення схем електричних станцій та підстанцій (рис. 1).

Програмний засіб дає можливість виконувати наступні операції: формувати розрахункову схему ЕС; формувати схеми розподільних пристроїв станцій та підстанцій; аналізувати наслідки аварій, які відбуваються на довільному елементі обладнання ЕС, який внесено до схеми. За результатами імітації аварії відображається детальна інформація щодо переліку знеструмленого обладнання, а також розраховується післяаварійний режим ЕС з визначенням струмів та рівнів напруги. Під час аналізу наслідків аварій визначаються ділення схеми ЕС на електрично незв'язані частини. Для кожної такої частини формується заступна схема і виконується розрахунок післяаварійного режиму.

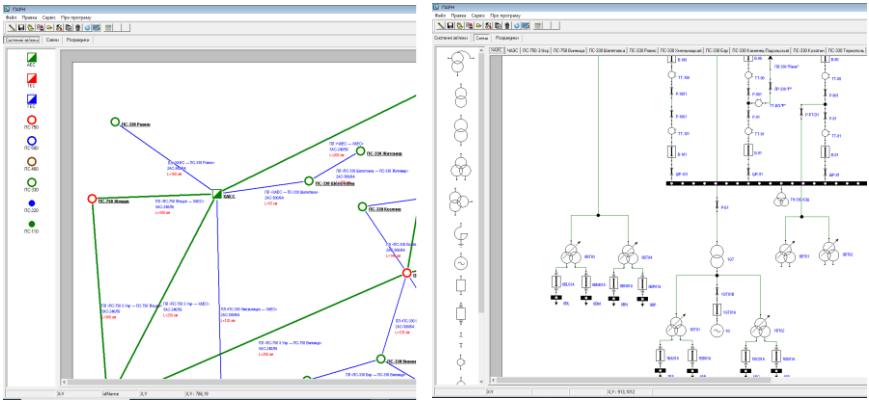


Рисунок 1. – Інтерфейс формування та відображення схеми ЕС на двох рівнях: укрупненого відображення ЕС (а) та детального відображення схем розподільних пристроїв (б)

Результати розрахунку післяаварійних режимів ЕС дають змогу контролювати технологічні обмеження під час формування керувальних

впливів. Таким чином програмний засіб створює умови для врахування не лише структурної, а й функціональної надійності. А отже, формування адекватніших рішень з ведення енергоефективних режимів енергосистеми.

Для імітування динаміки процесів у електричній системі та їх впливу на розвиток аварійної ситуації і, як наслідок, на оптимальні керувальні впливи кожна електростанція, системна підстанція, міжсистемний зв'язок чи споживач можуть бути задані типовими, або виміряними графіками навантаження. Результати імітації аварійних ситуацій з урахуванням динаміки процесів транспортування енергії подані на рис. 2

З наведеного видно, що у запропонованій моделі враховуються не лише наслідки комутацій розподільних пристроїв електростанцій та підстанцій, а й результати роботи автоматичних регуляторів збудження (зокрема на першому та другому генераторах Хмельницької АЕС).

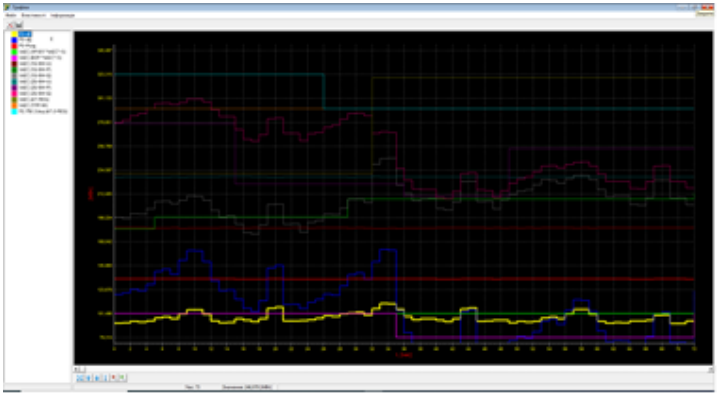


Рисунок 2. – Результати імітації аварійних ситуацій в ЕС з урахуванням заданих змін навантаження та генерування

Висновки

Розроблені математична модель електричної системи та графічне середовище забезпечують оцінювання структурної та, частково, функціональної надійності ЕС. Результати оцінювання збитків від недовідпуску електроенергії та зниження якості напруги у поєднанні з визначенням втрат електроенергії, пов'язаних з її транспортуванням, дають змогу комплексно оцінювати якість функціонування ЕС до та після впровадження відповідних керувальних впливів. Наявність модуля імітації динаміки транспортування електроенергії в ЕС дає змогу оцінювати ефективність керування не для поточного відліку, а протягом заданого проміжку часу. Такий підхід збільшує імовірність прийняття оператором адекватних рішень щодо безпечної експлуатації енергосистеми з оптимальними техніко-економічними показниками.

1. Rausand Marvin, Barros Anne, Hoyland Arnljot, “System Reliability Theory: Models, Statistical Methods, and Applications,” John Wiley & Sons, 2020, 813 p, Online ISBN: 9781119373940, DOI: 10.1002/9781119373940.
2. Evelyn Heylen, Geert Deconinck, Dirk Van Hertem, “Review and classification of reliability indicators for power systems with a high share of renewable energy sources,” Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 97, 2018, p. 554-568, ISSN 1364-0321, https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.08.032.
3. Wei Wang, Chao Fang, Shan Liu, Yisha Xiang, “Reliability analysis and optimization of multi-state sliding window system with sequential demands and time constraints,” Reliability Engineering & System Safety, Vol. 208, 2021, ISSN 0951-8320, https://doi.org/10.1016/j.ress.2021.107449.

В.Я. Тищенко, В.С. Грінченко

КОЕФІЦІЄНТ ПОТУЖНОСТІ ЕЛЕКТРОПРИЛАДІВ В ДОМОГОСПОДАРСТВАХ УКРАЇНИ

У відомих літературних джерелах зосереджено увагу на забезпеченні стійкості електропостачання [1]. Водночас вплив зростання реактивної потужності побутових електроприладів на якість електроенергії досліджено недостатньо. Так, масове використання світлодіодів та імпульсних джерел живлення (ІДЖ) створює нові виклики для розподільчих електромереж. Якщо раніше побутові навантаження були переважно резистивними чи індуктивними, наприклад, електродвигуни, нагрівальні елементи [2], то сьогодні переважають нелінійні пристрої, а саме, інвертори, випрямлячі, ІДЖ [3], що споживають несинусоїдальний струм і погіршують якість електроенергії. До таких електроприладів належать LED-лампи, телевізори, комп'ютери, зарядні пристрої тощо [4].

Традиційні електроприлади мають коефіцієнт потужності від 0,85 до 1, тоді як сучасна електроніка − значно нижчий. Зокрема, коефіцієнт потужності світлодіодних ламп становить приблизно 0,44 випереджального типу [5], що підвищує реактивні навантаження. Цифровізація побуту сприяє поширенню електроприладів з ІДЖ.

Побутові електроприлади, які використовуються в домогосподарствах, доцільно поділяти на традиційні − з резистивними та індуктивними навантаженнями, та сучасну побутову силову електроніку − з імпульсними перетворювачами енергії. В рамках даної роботи коефіцієнт потужності електроприладів досліджено експериментально. Обрано низку електроприладів типових для українських домогосподарств: традиційні − праска, фен, чайник, тостер, кавомолка, кавоварка, мультиварка, духовка, мікрохвильова піч, випрямляч волосся, пилосос, холодильник; сучасні − зарядний пристрій ноутбука, зарядний пристрій телефона, акустична система, системи LED-освітлення різного призначення, LED-телевізори і монітори, системний блок ПК, роутер. Для визначення коефіцієнта потужності використано вимірювач PMAC770 Multifunction Power Meter із класом точності 0,5 %, фото якого представлено на рис. 1.

Результати досліджень показали, що коефіцієнт потужності традиційних електроприладів знаходиться у діапазоні від 0,78 до 0,99, що відповідає помірному індуктивному навантаженню. Лише коефіцієнт потужності холодильника лежить поза цим діапазоном та становить 0,56.

Водночас всі розглянуті системи LED-освітлення мають випереджальні (ємнісні) характеристики з коефіцієнтами потужності від 0,5 до 0,6. Аналогічні показники отримано для LED-телевізорів і моніторів. Для іншої сучасної побутової силової електроніки отримано коефіцієнт потужності від 0,39 до 0,78.

Рисунок 1. – Фото вимірювача PMAC770 Multifunction Power Meter, встановленого на вимірювальному стенді

Таким чином, сучасна побутова силова електроніка формує ємнісні навантаження, що спричиняє суттєве зростання реактивної потужності. Зміна структури споживання електроенергії побутовими електроприладами вимагає подальшого аналізу впливу ємнісних навантажень і розроблення заходів компенсації.

1. Іськова, М. С., Буряк, А. Р., & Кирик, В. В. (2023). Електричні мережі номінальною напругою 20 кВ з джерелами накопичення енергії. Відновлювана енергетика, 2, 18–23.
2. Pihkala, A., Takala S., & Heine P. (2019). Analysis of changing consumer reactive power patterns in distribution grids. In Proc. 2019 Electric Power Quality and Supply Reliability Conference (PQ) & 2019 Symposium on Electrical Engineering and Mechatronics (SEEM), 1−6.
3. Elphick, S., Ciufo, P., & Perera, S. (2009). Supply current characteristics of modern domestic loads. In Proc. 2009 Australasian Universities Power Engineering Conference, 1–6.
4. Elphick, S. T. (2011). The modern domestic load and its impact on the electricity distribution network [Master's Thesis, School of Electrical, Computer and Telecommunications Engineering, University of Wollongong, Wollongong, Australia].
5. Jakusenoks, A., Laizans, A. S. (2015). Impact of household electric energy usage trends on electrical power supply net power factor. In Proc. Annual 21st International Scientific Conference: Research for Rural Development, 1, 253–257.

УДК 004.6:004.82

В.Р. Герасимов, В.В. Душеба

ОПТИМІЗАЦІЯ ПРОЦЕСІВ МІГРАЦІЇ БАЗ ДАНИХ ЯК ФАКТОР ПІДВИЩЕННЯ БЕЗПЕКИ ЕНЕРГЕТИЧНИХ ІНФОРМАЦІЙНИХ СИСТЕМ

Ключові слова: міграція баз даних, NoSQL, оптимізація структури даних, інформаційна безпека, енергетичні системи, цифрова трансформація.

У процесі цифрової трансформації енергетичних підприємств зростає роль даних як ключового ресурсу управління технологічними, комерційними та моніторинговими процесами. Безпека та доступність таких даних стають критичними чинниками стабільності функціонування енергетичних систем. Традиційні реляційні СКБД обмежують масштабування та гнучкість при роботі з потоками промислових і сенсорних даних, що стимулює перехід до документно-орієнтованих NoSQL-рішень. Водночас цей перехід потребує методичного забезпечення, яке поєднує оптимізацію структури даних із механізмами гарантування їхньої цілісності та захищеності (1).

З теоретичної точки зору, процес міграції даних може розглядатися як задача перетворення інформаційної моделі з фіксованою схемою у модель із гнучкою структурою. Відповідно, змінюється і парадигма забезпечення безпеки: від транзакційної ізоляції ACID до узгодженості на основі моделей BASE. Це породжує ризики втрати узгодженості, дублювання або неконтрольованих зв’язків між документами, що у критичних галузях — зокрема в енергетиці — може мати системні наслідки (2).

Метою дослідження є розроблення теоретичних засад і практичних підходів до оптимізації процесу міграції реляційних даних у NoSQL-сховища з урахуванням вимог інформаційної безпеки та цілісності. У роботі запропоновано алгоритмічну основу такого переходу, що включає застосування методів локального пошуку, жадібних алгоритмів, генетичних моделей та адаптивної денормалізації.

Локальний пошук (Local Search) використовується для поступового вдосконалення структури колекцій шляхом аналізу ефективності запитів і мінімізації затримок доступу. Це забезпечує адаптацію системи до змінних навантажень, типових для енергетичних IoT-компонентів. З позицій безпеки така оптимізація знижує частоту транзакційних конфліктів і ризик частково узгоджених оновлень (3).

Жадібні алгоритми (Greedy Algorithms) ефективні при обмежених часових ресурсах — вони забезпечують швидкий вибір оптимального рішення на кожному кроці, що критично для систем реального часу. Цей підхід зменшує кількість звернень до різних колекцій і тим самим знижує площу потенційної атаки, мінімізуючи кількість шляхів до конфіденційних об’єктів.

Генетичні алгоритми (Genetic Algorithms) дають змогу знаходити баланс між продуктивністю, цілісністю та відмовостійкістю, що особливо важливо для розподілених енергетичних систем. Вони формують оптимальні конфігурації структури документів, здатні протистояти розсинхронізації даних у разі мережевих або технічних збоїв.

Адаптивна денормалізація, заснована на прогнозуванні частоти запитів, дозволяє динамічно змінювати структуру даних залежно від реального навантаження. Це знижує латентність і сприяє сегментації інформаційних потоків відповідно до принципу мінімальних привілеїв (least privilege), підвищуючи рівень контролю доступу до критичних даних.

Сформована сукупність методів створює основу для побудови моделі безпечної міграції даних, що поєднує оптимізацію структури з перевіркою цілісності та контролем доступу (4). Така модель може бути інтегрована у процес розгортання та тестування енергетичних IT-систем, дозволяючи автоматично оцінювати ступінь ризику втрати або модифікації даних на кожному етапі трансформації .

Висновки

Оптимізація міграційних процесів від реляційних до NoSQL-систем виходить за межі задачі підвищення продуктивності — вона є складовою частиною комплексної стратегії інформаційної безпеки енергетичної галузі. Алгоритмічні методи оптимізації дозволяють зменшити кількість операцій з критичними даними, підвищити стійкість до збоїв і покращити контроль за узгодженістю інформації. Надалі доцільним є розроблення формальної моделі оцінки безпечності міграції, що враховуватиме рівень критичності даних, топологію мережі та сценарії експлуатаційних ризиків.

1. Герасимов В. Р., Душеба В. В. Аналіз методів оптимізації роботи баз даних // Електронне моделювання. — 2024. — Т. 46, № 6. — С. 43–54.
2. Saravanan Subramanian, Subhash Saravanan. Modern Trends in NoSQL Data Bases // *International Journal of Computer Trends and Technology (IJCTT)*. — 2024. — Vol. 72, no. 9. — Pp. 126-130.
3. Khan W. SQL and NoSQL Database Software Architecture: A Systematic Literature Review // Journal of Computer Science and Technology. — 2023. — Vol. 38, no. 2. — Pp. 1–15.
4. Chen Y., Zhang X. Adaptive Denormalization in Document Databases Using Query Prediction Models // Journal of Big Data. — 2023. — Vol. 10, no. 1. — Pp. 12–28.

Д.Ю. Великанов

ТЕХНІЧНІ ЗАСОБИ ЕСТЕТИЧНОГО ОСВІТЛЕННЯ ОФІСНИХ КОМПЛЕКСІВ

Ефективність освітлення в офісних приміщеннях та виставкових залах є одним із ключових факторів, що визначають як функціональні, так і ергономічні та естетичні характеристики внутрішнього простору. Раціонально спроектовані системи світлового забезпечення забезпечують рівномірний розподіл світлового потоку, що суттєво підвищує візуальний комфорт та знижує ризик зорової втоми у користувачів. Крім цього, оптимізація освітлення дозволяє суттєво скоротити енергоспоживання за рахунок інтеграції сучасних енергоефективних технологій, включаючи світлодіодні джерела світла та інтелектуальні системи керування освітленням. Такі рішення не тільки відповідають сучасним вимогам екологічної стійкості та довговічності обладнання, а й сприяють раціональному використанню ресурсів, зниженню експлуатаційних витрат та забезпеченню довгострокової економічної ефективності об'єктів. У сукупності це наголошує на значущості комплексного підходу до проектування освітлення, який враховує як інженерні, так і психофізіологічні аспекти сприйняття світлового середовища. Крім того, освітленість безпосередньо впливає на продуктивність праці, психофізіологічний стан та безпеку користувачів, а в експозиційних зонах – на сприйняття експонатів та цілісне сприйняття виставкового простору. Отже, грамотна організація світлового середовища є важливим інструментом підвищення функціональної ефективності архітектурного середовища та створення комфортних умов для перебування та діяльності людини.

Освітлення відкритих просторів є важливим елементом забезпечення комфортних та безпечних умов перебування людей, а також ефективного функціонування різних об'єктів інфраструктури у темний час доби. Для реалізації цієї задачі, як правило, застосовуються прожекторні установки та вуличні світильники різного типу. При проектуванні систем зовнішнього освітлення ключовою вимогою є забезпечення рівномірного розподілу світлового потоку по поверхні, що освітлюється, а також досягнення нормативних рівнів горизонтальної та вертикальної освітленості в залежності від функціонального призначення території.

Для освітлення великих площ, таких як промислові зони, транспортні вузли, спортивні споруди або великі громадські простори, широко використовуються високощоглові конструкції, де розміщуються комплекти світлових приладів з різними характеристиками світлорозподілу. Такий підхід дозволяє формувати світлове поле з оптимальним поєднанням інтенсивності та рівномірності освітлення.

Вибір освітлювального обладнання має здійснюватися з урахуванням чинних нормативно-технічних документів та стандартів. Особлива увага приділяється показникам енергоефективності, включаючи коефіцієнт корисної дії (ККД) світильників, а також коефіцієнту кольору, який повинен забезпечувати коректне сприйняття кольорів в просторі, що висвітлюється. Для встановлення на значних висотах, наприклад на щоглах або дахах будівель, переважно використовувати світильники з високими експлуатаційними характеристиками, надійною системою тепловідведення та стійкістю до зовнішніх кліматичних впливів. Це забезпечує тривалий термін служби обладнання та стабільні світлотехнічні параметри протягом усього періоду експлуатації системи освітлення.Завдяки продуманій конструкції світлодіодні світильники забезпечують можливість створення ефективних з точки зору енергоспоживання систем зовнішнього освітлення для різних відкритих територій. Така організація світлотехнічних рішень дозволяє зменшити загальну кількість освітлювальних приладів та опор, зберігаючи при цьому необхідні показники освітленості на всій площі.

Для підсвічування дорожніх проїздів, вулиць та транспортних ділянок зазвичай застосовуються спеціалізовані вуличні світильники. Їх монтують на опорах висотою від 6 до 12 метрів, оснащених обладнанням, призначеним для роботи у зовнішніх умовах. Подібні системи забезпечують рівномірний розподіл світла та безпечний рух транспорту та пішоходів у темний час доби.

Для забезпечення ефективної та тривалої роботи освітлювальних установок необхідно, щоб їх параметри відповідали чинним нормам ДБН та міжнародним стандартам освітлення.

У структурі сучасних систем штучного освітлення особливе місце займає організація світлового середовища на виставкових, експозиційних та музейних майданчиках. Висвітлення подібних просторів має комплексний характер, поєднуючи функціональні, естетичні та художні завдання. Світлові установки в даному контексті не обмежуються забезпеченням нормативних рівнів освітленості, а виступають як важливий інструмент формування візуально-просторового середовища.

При проектуванні експозиційних об'єктів особлива увага приділяється естетичним та дизайнерським характеристикам світильників: їхній архітектурній інтеграції у простір, відповідності загальної концепції оформлення, формоутворенню та колірному рішенню. Світлові акценти використовуються виділення ключових елементів експозиції, організації маршрутів руху відвідувачів і створення певного емоційно-психологічного сприйняття середовища.

У ряді випадків при виборі світлотехнічного рішення пріоритет віддається художній виразності та візуальної привабливості експозиції. Це може обумовлювати застосування менш енергоефективних технологій на користь досягнення необхідного художнього ефекту та цілісності композиції. Таким чином, організація освітлення на виставкових майданчиках є складним балансом між технічними, експлуатаційними та художніми

вимогами.Отже, проектування систем освітлення експозиційних об'єктів потребує вироблення збалансованих компромісних рішень, які забезпечують одночасно енергетичну ефективність, довговічність світлотехнічного обладнання та реалізацію художньо-дизайнерських концепцій.

1. Білякова. І.В. «Монтаж та експлуатація світлотехнічних установок» підручник для студентів за напрямом підготовки 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» всіх форм навчання: курс лекцій / І. В. Білякова. – Тернопіль: ТНТУ імені Івана Пулюя, 2017. – 117 с.
2. Методичні рекомендації до практичних занять з курсу Моделювання світлотехнічних установок для студентів за напрямом підготовки 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» усіх форм навчання / Білякова І.В., Осадца Я.М. (2018), - 85 с.

В.В. Коломієць, Л.А. Назаренко, О.М. Діденко

ОГЛЯД НОРМАТИВНИХ ДОКУМЕНТІВ, ЯКІ ВРАХОВУЮТЬ ВІЗУАЛЬНИЙ ТА НЕВІЗУАЛЬНОГО ВПЛИВУ СВІТЛА

Аналізуючи сучасні технології освітлення можна виділити основні технологічні тенденції: застосування “розумного освітлення”, застосування світлодіодних (LED) та OLED технологій, застосування сенсорного та автоматизоване освітлення, людиноцентричне освітлення, екологічний аспект.

Сучасні системи освітлення дедалі частіше враховують невізуальний вплив свытла на людину. Найбільш перспективними технологіями є використання світлодіодних світильинків з регульованою ККТ, людиноцентричне освітлення та системи керування освітленняс (табл 1.1).

Таблиця 1.1. – Технології освітлення та їх вплив на людину

Технологія	Особливості	Вплив на людину
LED з регульованою ККТ	Зміна кольору світла	Підтримка циркадного ритму
Людиноцентричне освітлення;	Імітація природного циклу освітлення	Покращення самопочуття, концентрацію уваги
Системи керування освітленням	Датчики руху, освітленості, таймери	Енергоефективність, адаптаці до потреб

Проєктування освітлення має відповідати таким нормативним документам:

- ДБН В.2.5-28:2018 – природне і штучне освітлення, є чинним нормативним документом, який регламентує вимоги до освітлення в будівлях і на територіях різного призначення в Україні. Вони охоплюють: житлові, громадські, виробничі будівлі, об'єкти цивільного захисту, відкриті простори: парки, пляжі, дороги, фасади, дитячі майданчики, автостоянки, ринки, кладовища, місця виконання робіт на відкритому повітрі, зовнішнє освітлення міст, сіл, курортних зон тощо
- EN 12464-1 – «Light and lighting – Lighting of work places – Part 1: Indoor work places» – це європейський стандарт, який встановлює вимоги до освітлення робочих місць у приміщеннях. В Україні він гармонізований як ДСТУ EN 12464-1:2016, а з 2022 року діє оновлена редакція – ДСТУ EN 12464-1:2022 (EN 12464-1:2021, IDT);

Якщо говорити про освітлення, що орієнтовано на людинути то в світі є ряд нормативних докуметрів які це регулюють, а саме:

• DIN SPEC 67600 – рекомендації щодо біологічного впливу світла. Це унікальний німецький технічний документ, який встановлює рекомендації щодо біологічно ефективного освітлення в приміщеннях. Його мета – не просто забезпечити видимість, а впливати на біоритми, самопочуття та продуктивність людини через світло. DIN SPEC 67600 охоплює житлові та робочі простори, а також змішані зони (наприклад, будинки для літніх людей, офіси, навчальні заклади, лікарні). Рекомендує використовувати природне світло як пріоритетне джерело, а штучне – як доповнення або заміну. Визначає параметри освітлення, які впливають на біологічні процеси: Спектральний склад світла. Напрямок і динаміка освітлення. Тривалість експозиції. Він не є обов'язковим стандартом, а слугує технічним звітом з рекомендаціями для проєктувальників.

Використовується для: покращення самопочуття працівників і мешканців, для оптимізації освітлення для змінної роботи, для підтримки когнітивної активності в навчальних закладах та для зменшення депресивних станів у закритих приміщеннях з недостатнім природним світлом.

• DIN/TS 67600:2022-08 Complementary criteria for lighting design and lighting application with regard to non-visual effects of light (Додаткові критерії світлового дизайну та застосування освітлення щодо невізуальних ефектів світла). Цей документ зосереджений на невізуальному впливі світла – тобто на його здатності: стабілізувати циркадні ритми, покращувати концентрацію, настрій, сон і загальне самопочуття та підвищувати ефективність у робочих і навчальних середовищах.

Ключовими положення цього документу є:

1. Цільова освітленість: мінімум 250 MEDI Lux (Melanopic Equivalent Daylight Illuminance) протягом 4 годин у першій половині дня на рівні голови людини (1.2 м сидячи, 1.6 м стоячи).

2. Спектральний склад світла: враховується Melanopic Ratio (MR) та Melanopic Daylight Equivalent Ratio (MDER) для оцінки біологічної ефективності світильників.

3. Динаміка освітлення: світло має змінюватися протягом дня, імітуючи природний цикл – яскраве холодне світло вранці, тепле приглушене ввечері

4. Сфери застосування: офіси, школи, лікарні, будинки для літніх людей, житлові приміщення, змішані простори.

Особливостями цього документу є те, що:

- Вперше введено інтегровану модель освітлення, яка враховує як візуальні, так і не візуальні ефекти;

- Визначено методики розрахунку освітленості з урахуванням біологічного впливу;

- Надано чек-листи та приклади застосування для різних типів приміщень: офіси, школи, медичні заклади, житлові зони;

• WELL Building Standard – це міжнародна система сертифікації, яка оцінює здоров'я, комфорт і добробут людей у будівлях. Його розроблено

International WELL Building Institute (IWBI), і він базується на наукових дослідженнях у галузі медицини, архітектури, психології та екології.

1. ДСТУ EN 12464-1:2022. Світло та освітлення. Освітлення робочих місць. Частина 1. Внутрішні робочі місця [Чинний від 2022-31-12]. Вид. офіц. Київ, 2023. 47 с. (Інформація та документація).
2. ДБН В.2.5 – 28 – 2018. Природне і штучне освітлення. [На заміну ДБН В.2.5-28-2006; Чинний від 2019-03-01]. Вид. офіц. Київ, 2018. 76 с. (Інформація та документація).
3. DIN/TS 67600:2022-08 Complementary criteria for lighting design and lighting application with regard to non-visual effects of light. p. 75 https://dx.doi.org/10.31030/3356703
4. WELL v2™. URL: https://v2.wellcertified.com/en/wellv2/overview (date of access: 19.10.2025).

В.О. Варченко

ПРИНЦИПИ СПОРТИВНОГО ОСВІТЛЕННЯ

Формування раціональної системи спортивного освітлення є складною, багатоплановою і міждисциплінарною інженерно-технічною задачею, обумовленою необхідністю узгодження комплексу найчастіше суперечливих вимог, що пред'являються до зорової ергономіки, функціональності та безпеки спортивного простору. Одним із ключових аспектів є забезпечення оптимальних умов зорового сприйняття, що включають досягнення нормативного рівня освітленості та її рівномірного розподілу в зоні зорового сприйняття, контроль показників яскравості та контрастності об'єктів спостереження, а також ефективну мінімізацію сліпучої дії світлових приладів (дискомфортної та оздоблювальної).

Перелічені параметри відіграють визначальну роль у формуванні комфортного, стійкого та безпечного візуального середовища, необхідного для коректного сприйняття об'єктів, що рухаються спортсменами, оперативного та об'єктивного прийняття рішень суддями, а також для підвищення глядацького комфорту та якості трансляції спортивних заходів. Крім того, спортивне освітлення має відповідати низці нормативно-технічних документів, що додатково ускладнює процес проектування.

Для спортсменів система освітлення спортивних споруд повинна забезпечувати можливість оперативного і точного розпізнавання об'єктів, що спостерігаються (м'яча, шайби, спортивного снаряда та ін.), які, як правило, характеризуються високою швидкістю переміщення на тлі яскравості навколишнього простору, що змінюється. При цьому кутові розміри об'єкта можуть істотно змінюватись, а сам спостерігач у більшості випадків також перебуває в русі.

Ефективне сприйняття візуальної інформації за таких умов є критично важливим для швидкого прийняття рішень. Спортсмен повинен не тільки точно визначати положення об'єкта у просторі, а й своєчасно оцінювати особливості його руху, прогнозувати траєкторію та координувати свої дії з діями інших учасників.

У неігрових видах спорту якісна система освітлення забезпечує виконання регламентованої спортивної програми в повному обсязі та сприяє зниженню ризику травматизму. Це досягається за рахунок покращення зорових умов, підвищення безпеки тренувального процесу та забезпечення комфортного зорового середовища для спортсменів та обслуговуючого персоналу.

Для забезпечення оптимальних зорових умов при проведенні спортивних заходів система штучного освітлення повинна створювати такі параметри світлового середовища, які дозволяють спортсменам швидко та точно ідентифікувати об'єкти спостереження (м'яч, шайба, спортивний

снаряд та ін.). Ці об'єкти, як правило, рухаються з високою швидкістю на тлі змінної яскравості та контрастності навколишнього простору. Додатково ускладнюючим фактором є зміна кутових розмірів об'єкта в процесі його переміщення, а також те, що сам спостерігач найчастіше перебуває в русі.

У подібних умовах освітлення відіграє ключову роль у забезпеченні оперативного сприйняття та аналізу візуальної інформації. Спортсмен повинен не тільки точно визначати просторове становище об'єкта, але й вміти швидко оцінювати параметри його руху, прогнозувати подальшу траєкторію та синхронізувати свої дії із діями інших учасників ігрового процесу.

Для неігрових видів спорту високоякісне освітлення має не менш важливе значення. Воно забезпечує виконання нормативних вимог спортивних програм, покращує зорове сприйняття та сприяє зниженню ймовірності травматизму. Підвищені зорові комфорт та безпека тренувального процесу досягаються за рахунок рівномірного розподілу світлового потоку, оптимальних рівнів яскравості та виключення сліпучої дії світильників.

Для забезпечення об'єктивного сприйняття спортивних подій суддями та глядачами необхідно забезпечити їх швидку та стійку візуальну фіксацію. Це завдання набуває особливої ваги в умовах великих спортивних споруд, де відстань до об'єкта спостереження може досягати сотень метрів, а його кутові розміри обмежуються кількома хвилинами дуги.

З огляду на видовищний характер спортивних заходів важливо формувати оптимальні умови візуального сприйняття. Ключовими вимогами є підтримання достатньої яскравості об'єктів, що спостерігаються, рівномірний розподіл світлового потоку по ігровому полю, мінімізація сліпучої дії джерел освітлення, а також забезпечення коректної кольору. Конкретні методи реалізації цих вимог визначаються специфікою відповідного виду спорту.

При проектуванні систем освітлення для спортивних об'єктів, призначених для неігрових видів спорту, необхідно враховувати, чи зберігається лінія зору спортсмена незмінною чи змінюється під час виконання вправ, оскільки це суттєво впливає вимоги до рівня та спрямованості світлового потоку.

У ряді випадків освітлювальні системи повинні одночасно задовольняти кільком, часом суперечливим вимогам, що особливо для комбінованих і багатофункціональних спортивних споруд. При цьому будь-яка система освітлення має забезпечувати спортсменам можливість повноцінного виконання вправ, а глядачам та суддям — надійне спостереження за перебігом змагань. Розміри та значимість спортивного об'єкта беруться до уваги при виборі кількісних та якісних характеристик освітлення.

У спортивній практиці освітленість сприймається як ключовий кількісний показник ефективності роботи освітлювальної системи, що забезпечує необхідний рівень видимості. Для більшості видів спорту

встановлюються мінімальні значення горизонтального освітлення, які є простим і надійним критерієм оцінки якості освітлення. Важливим аспектом створення комфортних умов для візуальної роботи спортсменів та глядачів є обмеження сліпучої дії джерел світла. При цьому контроль засліплення світильників, включаючи світлодіодні установки в малих басейнах, може бути не менш значущим, ніж аналогічний контроль потужних прожекторних систем великих спортивних об'єктах.

Зниження сліпучого ефекту досягається за рахунок підвищення адаптаційного рівня зору спортсменів та глядачів за допомогою зменшення нерівномірності розподілу яскравості у полі зору. Для цього рекомендується організовувати освітлення глядацьких трибун, використовувати світлі тони фарбування стін та стель спортивних залів, а також частково спрямовувати світловий потік світильників у верхню напівсферу приміщення.

1. Крижановська Н. Я. Світло-колірний дизайн: конспект лекцій для студентів 5 курсу за спеціальністю 191 – Архітектура та містобудування, освітня програма підготовки магістрів «Дизайн архітектурного середовища» / Н. Я. Крижановська, О. В. Смирнова; Харків. нац. ун-т. госп-во ім. А. М. Бекетова. - Харків: ХНУМГ ім. А. М. Бекетова, 2020. - 48 с.
2. Шевченко О.О., Бондаренко І.П. Особливості вибору освітлення для громадських приміщень. Архітектура та будівництво України. 2021. № 2. с. 38-42.

Є.В. Котух

CYBER-PHYSICAL RISK ASSESSMENT OF DRONE-ENABLED POWER INFRASTRUCTURE INSPECTIONS: COUNTERMEASURES AND FLIGHT POLICY FRAMEWORK

Inspections of overhead power lines and substations with unmanned aircraft systems (UAS) have already become standard thanks to shorter inspection cycles, improved personnel safety, and higher defect-detection accuracy (EO/IR, LiDAR, coronagraphy), yet they simultaneously open a new spectrum of cyber-physical risks that can affect supply continuity and facility safety. In the current critical-infrastructure threat profile, opportunistic actors, organized criminal groups, and capable APT adversaries are all active; their vectors span the UAS platform itself (autopilot, firmware, sensors, CAN/UART buses and OTA updates), C2/video/telemetry links (FHSS/LoRa/OFDM, IP-over-LTE/5G/satellite), navigation (GNSS spoofing and jamming, geofence bypass), ground control stations (software, drivers, keys, stored missions), cloud services and storage (access paths, authentication, third-party control), as well as IT/OT interfaces (DMZ gateways to SCADA/EMS/DMS and integrations with GIS/EAM/CMMS), compounded by human factors and procedural errors.

Potential consequences include C2 takeover or Man-in-the-Middle attacks, forced landings and “return-to-trap,” navigation failures, supply-chain firmware modification, poisoning of observation datasets and substitution of media artifacts, leakage of sensitive facility imagery, and even physical incidents on conductors, insulators, and equipment. To manage risk systematically, it is advisable to base mission classification—especially BVLOS—on SORA/ConOps, map techniques from MITRE ATT&CK for ICS onto the flight lifecycle, apply IEC 62443-style zones and conduits for placing UAS services within a substation campus, and evaluate impacts on confidentiality, integrity, availability, and human/asset safety using KPI metrics (share of encrypted missions, C2 latency/jitter SLOs, percentage of verified firmware signatures, packet-loss levels, and GNSS SNR).

A multilayered defense begins with communications: mandatory end-to-end encryption and mutual authentication with key rotation; for IP links—TLS 1.3 with modern profiles and, where feasible on ground gateways and cloud endpoints, hybrid key exchange based on X25519+ML-KEM as a transition toward quantum-resilient operation; for non-IP protocols like MAVLink—MAVLink2 frame signing combined with channel encryption; for FPV—SRTP/DTLS instead of “open video,” complemented by RF hygiene (directional antennas, fallback bands, multi-pathing LTE/5G↔RF↔satellite). Navigation integrity is ensured by multi-constellation GNSS with inertial navigation, RAIM/ARAIM and visual odometry, plus RF-sensor detection of jamming; where available, enable authenticated navigation (e.g., OSNMA) and implement hardware/firmware geofencing and

RTH policies with safe failsafe scenarios. Platform robustness is strengthened by secure boot and a hardware root of trust (TPM/SE), isolation of security domains, bus control via allow-listed messages and anomaly monitoring; plan software and field-artifact signing chains with a view to be migrating from ECDSA/Ed25519 to ML-DSA/SLH-DSA. For data protection and privacy, encrypt "in flight" and "at rest," enforce role-based access, apply de-identification and PII blurring, use immutable time-stamped storage for incident artifacts, digitally sign media and reports, and harden ML pipelines against data poisoning (sample validation, model sandboxes). Within legal bounds, counter-UAS capabilities matter multi-sensor detection (RF/radar/EO-IR), track correlation, Remote ID allow-lists to deconflict with the authorized fleet, cryptographic "badges" for friendly drones, and a clear escalation playbook to site security, grid dispatch, and law enforcement. At the IT/OT boundary, enforce segmentation: place UAS services in a DMZ, use one-way gateways and brokers to export results into SCADA/EMS/DMS/GIS/CMMS, sanitize files, verify signatures, and apply quotas and sandboxes for media processing. Flight policies should define the operation category (VLOS/BVLOS), meteorological and spatial minima, a matrix of prohibited/conditional zones (substations, transmission rights-of-way, security perimeters), and the crew briefing structure (route, alternates, local RF profile, frequencies/IDs, comms plan), along with a pre-flight checklist (keys, software versions, geofences, sensor and battery status, stand-off distances to indoor/outdoor switchgear and transformer bays), online monitoring of telemetry and RF indicators with spoof/jam detection, and post-flight procedures (log analysis, media hash verification, upload to immutable storage, technical report).

A 12–24-month implementation roadmap includes a cryptography and asset inventory with ownership; quick wins in 0–6 months (mandatory C2/video encryption, mutual auth, baseline SOP, UAS-segment isolation, RF sensors); 6–12 months (DMZ segmentation, a fleet PKI, software/artifact signing, automated data offload, pilots of hybrid TLS on gateways); and 12–24 months (multi-sensor C-UAS, a simulation range and substation "digital twin," regular red/blue exercises, transition to crypto-agile profiles ready for post-quantum signatures and KEM). A representative incident scenario: during a BVLOS mission, SNR drops, GNSS anomalies arise, and FPV packet loss spikes; the system raises "potential spoofing/jamming," activates "Safe-Hold" (speed reduction, climb to a safe altitude, fallback route with visual-inertial navigation, return-to-home); logs and telemetry are encrypted and shipped to immutable storage; the SOC and dispatcher are alerted; RF sensors and perimeter cameras switch to heightened monitoring; after landing, a post-flight review is performed, the risk map is updated, and geofences are adjusted. In aggregate, effective UAS use in the power sector rests on a coherent cyber-physical architecture: flight policies and SOP/SORA, technical controls (cryptography, navigation integrity, C-UAS), IT/OT segmentation, clean supply chains, evidence-grade data integrity, and regular exercises under realistic RF conditions; it is prudent to align with IEC 62443 and 62351 requirements, JARUS SORA, RFC 8446 (TLS 1.3), CISA materials on

UAS risk, and transition guidance for post-quantum cryptography (FIPS 203/204/205 and subsequent signature and key-exchange profiles).

Example of an incident and recovery scenario

During a BVLOS survey of a power line, SNR degradation, GNSS anomalies, and a packet loss in FPV are detected. The operator receives a "potential spoofing/jamming" warning, and the "Safe-Hold" profile is automatically activated: speed reduction, climb to a safe altitude, transition to a backup route with visual-inertial navigation, RTH. Logs and telemetry are encrypted and sent to storage; the SOC and the duty dispatcher receive notifications; RF sensors and substation perimeter cameras begin enhanced monitoring. After landing, post-flight analysis, risk map update, and geofence correction.

Conclusion

Effective and secure use of UAVs in the energy sector requires a multi-layered cyber-physical architecture where flight policies, technical controls (cryptography, navigational integrity, C-UAS), processes (SOP/SORA), and OT/IT segmentation work in concert. The keys to resilience are crypto-agility, clean supply chains, evidence-based data integrity practices, and regular training with simulated real-world RF/environmental conditions.

1. CISA. (2025). Unmanned Aircraft Systems Addressing Critical Infrastructure Security Challenges.
2. CISA (2025). Protect Critical Infrastructure and Public Gatherings. https://www.cisa.gov/topics/physical-security/be-air-aware/protect-critical-infrastructure-and-public-gatherings.

В.С. Кравчук, Я.Ю. Дорогий, В.В. Цуркан

БЕЗПЕКА КРИТИЧНОЇ ІНФРАСТРУКТУРИ ЕНЕРГЕТИЧНОЇ ГАЛУЗІ

Анотація. Стаття присвячена аналізу безпеки критичної інфраструктури (КІ) енергетичної галузі з фокусом на технічні та юридичні аспекти. Розглянуто специфічні нюанси сектору, такі як вразливість до кібератак, фізичних загроз (включаючи воєнні дії та природні фактори), інтеграцію відновлюваних джерел енергії та ядерних об'єктів. На основі міжнародного та українського досвіду, з урахуванням подій 2025 року, запропоновано рекомендації щодо посилення захисту, з акцентом на стійкість систем в умовах гібридних загроз. Метою є розробка комплексного підходу для забезпечення надійності енергетичної інфраструктури, враховуючи правові рамки та технічні стандарти.

Ключові слова: критична інфраструктура, енергетична галузь, технічна безпека, юридичні аспекти, кібербезпека, фізичний захист, ядерна енергетика, стійкість, правове регулювання, ризики, відновлювані джерела енергії, гібридні загрози.

Вступ. Безпека критичної інфраструктури енергетичної галузі є фундаментальним елементом національної безпеки, оскільки цей сектор забезпечує функціонування інших галузей економіки та суспільства. В сучасних умовах, особливо в Україні, енергетична КІ стикається з унікальними викликами: кібератаками на системи управління (наприклад, SCADA), фізичними атаками на електростанції та лінії передачі, а також природними ризиками, такими як блискавки для ядерних об'єктів. Технічні аспекти охоплюють впровадження систем захисту від перешкод, тоді як юридичні – формування нормативної бази для координації суб'єктів та відповідальності. Метою статті є аналіз цих аспектів з виділенням нюансів енергетичного сектору, включаючи взаємозалежність мереж, високі наслідки збоїв (наприклад, масові відключення електроенергії) та необхідність інтеграції міжнародних стандартів (наприклад, IAEA, IEC). Об'єктом дослідження є об'єкти КІ енергетики, предметом – технічні заходи та правове регулювання. Стаття базується на аналізі літературних джерел та пропонує рекомендації для посилення стійкості, з урахуванням недавніх подій 2025 року, таких як посилення російських атак на енергетичну інфраструктуру.

Аналіз літературних джерел. Аналіз літературних джерел базується на наукових публікаціях, нормативних актах та аналітичних звітах, присвячених безпеці критичної інфраструктури енергетичної галузі. Ці матеріали охоплюють як український, так і міжнародний досвід, з акцентом на технічні заходи захисту (кібербезпека, фізичний захист, оцінка ризиків) та юридичні

аспекти (нормативна база, міжнародні стандарти, державно-приватне партнерство). Вони свідчать про необхідність інтегрованого підходу для подолання прогалин у регулюванні та посилення стійкості в умовах гібридних загроз.

У статті [1] розглянуто ключові завдання політики національної безпеки у сфері захисту критичної інфраструктури, з акцентом на енергетичний сектор як один із шляхів зміцнення енергетичної безпеки, включаючи організаційні та правові аспекти. Документ аналізує вразливості енергетичного сектору до кібер- та фізичних загроз, пропонуючи інтегровані заходи для посилення стійкості, такі як оцінка ризиків та координація між державними органами. Ключові знахідки підкреслюють взаємозалежність енергетики з іншими секторами, а методологія базується на аналізі нормативної бази та рекомендаціях для державної політики. Авторами статті [2] запропоновано ключові напрями вдосконалення системи безпеки КІ, включаючи модернізацію протиповітряної оборони та створення резервних центрів, з фокусом на сучасні виклики та загрози. Аналіз охоплює енергетичний сектор як первинну ціль атак, з оцінкою збитків (понад $8.8 млрд) та рекомендаціями щодо технічних заходів (AI для моніторингу) та юридичних реформ (посилення координації між державою та приватним сектором). Методологія включає аналіз літератури, статистики та порівняльний підхід з міжнародним досвідом. Праця [3] висвітлює стійкість критичної енергетичної інфраструктури в контексті національної стійкості України, з урахуванням організаційних та правових аспектів. Документ класифікує об'єкти енергетики за критичністю, пропонуючи пробабілістичні моделі оцінки ризиків та рекомендації щодо децентралізації мереж, інтеграції відновлюваних джерел та юридичного регулювання. Методологія базується на факторному аналізі вразливостей та моделюванні сценаріїв. У статті [4] сформульовано стратегічні цілі державної політики в сфері захисту КІ, з акцентом на створення системи в Україні. Документ розглядає енергетику як пріоритетний сектор, з рекомендаціями щодо інтеграції технічних стандартів (IEC) та юридичних норм (міжнародні конвенції). Аналітична доповідь [5] висвітлює теоретичні та нормативно-правові засади створення системи безпеки і стійкості КІ в Україні. Аналіз включає енергетичний сектор як ключовий, з пропозиціями щодо державно-приватного партнерства та технічних заходів для стійкості. Стаття [6] досліджує міжнародний досвід запобігання злочинності у сфері енергетичної безпеки. Стаття порівнює підходи США (інтегровані законодавчі рамки з CISA), ЄС (стандартизовані директиви як CER) та Азії (CPTED для фізичного захисту), з рекомендаціями для України щодо технічного захисту енергетичних об'єктів (кібербезпека, антидронові системи) та юридичних санкцій. Методологія – порівняльний аналіз законодавства та превентивних стратегій. У статті [7] підкреслено інтегрований підхід для досягнення стійкості КІ в умовах глобалізації, охоплюючи правові, технічні аспекти. Документ класифікує енергетичні об'єкти за критичністю, пропонуючи

моделі оцінки ризиків та рекомендації щодо смарт-грідів і юридичного регулювання. Стаття [8] акцентує увагу на кібербезпеці КІ під час воєнних дій, як ключовому аспекті національної безпеки. Стаття аналізує атаки на енергетичний сектор (DDoS, NotPetya), пропонуючи технічні заходи (моніторинг з CERT-UA) та юридичні рамки. У статті [9] ідентифіковано енергетичний сектор як унікально критичний через його "вмикаючу" функцію для інших інфраструктур. Документ описує загрози та заходи захисту, з акцентом на юридичні аспекти. У статті [10] перелічено 16 секторів КІ, включаючи енергетику, з акцентом на фізичні та віртуальні системи. Енергетика виділена як ключовий сектор з вразливостями до кіберзагроз. Наукова праця [11] розглядає захист КІ від кібератак в енергетичному секторі. Стаття описує ризики цифровізації, заходи подолання та юридичні аспекти. У статті [12] розроблено рекомендації щодо кібер- та фізичної безпеки загроз для енергетичної інфраструктури. OEIS акцентує на партнерствах для виявлення загроз. У статті [13] описано стратегії захисту КІ для комунальних послуг, включаючи Zero Trust. Стаття фокусується на кібербезпеці енергетики, викликах (legacy-системи) та юридичних аспектах. У статті [14] розглянуто захист критичної інформаційної інфраструктури як національний пріоритет, з акцентом на енергетичний сектор як вразливу ціль кібератак. Автори пропонують комплексний підхід з технічними заходами та юридичними реформами. У статті [15] запропоновано алгоритм пріоритезації вимог при розробці програмного забезпечення для об’єктів КІ, з фокусом на енергетичний сектор.

Ці джерела свідчать про прогалини в регулюванні, такі як відсутність уніфікованої методології ризиків, та необхідність посилення державно-приватного партнерства в енергетичному секторі.

Основна частина. **Технічні аспекти безпеки критичної інфраструктури енергетичної галузі.** Технічний захист критичної інфраструктури енергетики включає комплекс заходів проти фізичних, кібер- та природних загроз, з урахуванням специфіки сектору: високої взаємозалежності (вплив на транспорт, охорону здоров'я, промисловість), масштабних наслідків збоїв (наприклад, блекаути, що призводять до економічних втрат у мільярди доларів) та вразливості об'єктів (ядерні станції до електромагнітних імпульсів, лінії передачі до фізичних атак). У сучасних умовах енергетична критична інфраструктура стикається з особливими викликами, включаючи відновлення систем та інтеграцію нових технологій. Ключові напрямки технічного захисту можна розділити на підгрупи.

Фізичний захист інфраструктури. Фізичний захист охоплює заходи для запобігання прямим атакам, природним катастрофам та людським загрозам. У енергетичному секторі нюанс полягає в розподіленій природі мереж (електромережі, газопроводи, нафтопроводи), що робить їх вразливими до диверсій та воєнних дій. Рекомендується впровадження мобільного спостереження, включаючи дрони та датчики для моніторингу віддалених

об'єктів, як електростанції та трансформатори. Стандарти передбачають системи блискавкозахисту, зонування захисту, екранування кабелів та пристрої від перенапруг, особливо для ядерних об'єктів, де ймовірність пошкоджень від блискавок становить 10^{-4}–10^{-6} на рік. У контексті України, з урахуванням воєнних ризиків, фізичний захист включає модернізацію протиповітряної оборони, створення резервних логістичних центрів та аварійно-рятувальних систем, а також багатошаровий підхід з бар'єрами, такими як огорожі, камери та сенсори руху. Людські загрози, як саботаж, вимагають біометричного контролю доступу та тренінгів персоналу. Нюанс енергетики – захист від фізичних атак на газові об'єкти, що впливають на європейські поставки.

Кібербезпека та захист операційних технологій. Кібербезпека є критичною через інтеграцію цифрових систем у енергетику, таких як системи управління та промислові контрольні системи. Нюанс сектору – вразливість до шкідливого програмного забезпечення та просунутих постійних загроз, що можуть призвести до відключень. Рекомендується впроваджувати модель нульової довіри, сегментацію мереж, ізоляцію критичних систем та моніторинг аномалій за допомогою штучного інтелекту. Захист операційних технологій слід сфокусувати на промислових мережах, де загрози включають маніпуляцію датчиками чи контролерами, що призводить до фізичних пошкоджень (наприклад, вибухи на газових станціях). Інтеграція відновлюваних джерел (сонячні, вітрові) збільшує точки входу для хакерів, вимагаючи стандартів для безпеки операційних технологій та регулярних тестів на проникнення. Рекомендується запровадити технології, такі як блокчейн для ланцюгів постачань та штучний інтелект для прогнозування загроз, будують стійкість.

Оцінка та управління ризиками. Оцінка ризиків базується на пробабілістичних моделях, паспортизації об'єктів та категоризації. У енергетиці нюанс – взаємозалежність, де збій в одній мережі (наприклад, електрика) впливає на інші (газ, нафта). Рекомендується використання інструментів для ідентифікації вразливостей, включаючи симуляції атак та планування стійкості. Назараз відсутня єдина методологія, що ускладнює захист, особливо в окупованих регіонах, де потрібна децентралізація (мікрогріди на відновлюваних джерелах).

Юридичні аспекти безпеки критичної інфраструктури енергетичної галузі. Юридичне регулювання безпеки критичної інфраструктури енергетики базується на комплексі нормативних актів, адаптованих до воєнних умов, з інтеграцією міжнародних стандартів. Нюанси сектору – фрагментоване регулювання, вплив зовнішньої агресії та необхідність балансу між національною безпекою та європейською інтеграцією. Наразі юридичне забезпечення еволюціонувало через нові закони та міжнародну співпрацю, реагуючи на ескалацію атак. Ключові елементи регулювання можна структурувати за напрямками.

Національне правове регулювання. Основою є закон, який визначає об'єкти критичної інфраструктури, реєстр та суб'єктів. Енергетика класифікується як стратегічний сектор, з обов'язками операторів щодо стійкості, але регулювання фрагментоване: терміни створюють плутанину. У воєнний час доповнюється законодавством про воєнний стан, з посиленням відповідальності за пошкодження. Новинкою є закон про сталу трансформацію енергетичного сектору, який інтегрує зелений перехід з безпековими заходами, включаючи захист відновлюваних об'єктів. Є і свій нюанс – слабке залучення місцевого самоврядування та приватного сектору, що вимагає державно-приватного партнерства для фінансування захисту.

Міжнародне регулювання та співпраця. Міжнародні аспекти включають стандарти для ядерної безпеки та європейські директиви для кіберзахисту. Україна адаптує правові рамки до європейських, як у створенні конкурентних ринків газу та електрики, що посилює стійкість. Співпраця з партнерами активізувалася: робочі зустрічі щодо захисту критичної інфраструктури, фонди реконструкції для відновлення енергетики та санкції проти агресора. Засуджені атаки на енергетику як загрозу для Європи, пропонуючи спільні заходи. Нюанс – правові аспекти транскордонних мереж (газові транзити), де атаки впливають на сусідів, вимагаючи міжнародних конвенцій.

Удосконалення правового регулювання. Для подолання прогалин рекомендується уніфікація термінів, створення постійного уповноваженого органу та інтеграція штучного інтелекту в оцінку ризиків з регулюванням етичних аспектів. У контексті війни – посилення кримінальної відповідальності за кібератаки та фізичні диверсії.

Рекомендації щодо удосконалення. Виявлені в аналізі літературних джерел проблеми, такі як відсутність уніфікованої методології оцінки ризиків, фрагментоване регулювання, недостатнє державно-приватне партнерство та прогалини в координації, вимагають комплексних заходів для посилення безпеки критичної інфраструктури енергетичної галузі. Ось ключові рекомендації:

– Розробити та впровадити єдину національну методологію оцінки ризиків для об'єктів енергетики, базуючись на пробабілістичних моделях та стандартах (наприклад, інтеграція штучного інтелекту для прогнозування загроз). Це дозволить усунути плутанину в класифікації об'єктів та підвищити ефективність захисту, особливо в умовах воєнних дій.

– Посилити державно-приватне партнерство через створення спільних фондів фінансування та платформ для обміну інформацією між операторами, державними органами та міжнародними партнерами. Це включає залучення приватного сектору до розробки технічних рішень (наприклад, децентралізованих мікрогрідів) та юридичних реформ для стимулювання інвестицій у стійкість.

– Уніфікувати термінологію та нормативну базу, усунувши "точкове" регулювання шляхом оновлення законів про критичну інфраструктуру та

кібербезпеку. Створити постійний уповноважений орган для координації заходів, з акцентом на інтеграцію європейських директив та стандартів IAEA для ядерної безпеки.

– Розширити міжнародну співпрацю, включаючи спільні тренінги, обмін технологіями та санкційні механізми проти загроз. Для енергетичного сектору рекомендується фокус на захисті транскордонних мереж через багатосторонні угоди.

– Інтегрувати сучасні технології, як Zero Trust для кібербезпеки та мобільне спостереження для фізичного захисту, з обов'язковими тренінгами персоналу та регулярними аудитами. Це допоможе подолати вразливості, пов'язані з людським фактором та legacy-системами.

Автори вважають, що ці рекомендації дозволять підвищити стійкість енергетичної інфраструктури, мінімізуючи наслідки гібридних загроз та сприяючи зеленому переходу.

Висновки. Безпека КІ енергетичної галузі вимагає інтегрованого підходу, поєднуючи технічні (фізичний захист, кібербезпека, оцінка ризиків) та юридичні (національні закони, міжнародна співпраця) аспекти. На це вказують певні нюанси сектору – вразливість до гібридних атак, необхідність децентралізації та адаптації до воєнних умов в Україні, особливо у 2025 році. В якості рекомендацій автори запропонували наступні заходи, зокрема створення постійного координатора, уніфікація методології, посилення ДПП та фінансування для стійкості, мінімізації наслідків та зеленого переходу.

1. Бірюков Д. С. Захист критичної інфраструктури: проблеми та перспективи впровадження в Україні : аналітична доповідь [Електронний ресурс] / Д. С. Бірюков, С. І. Кондратов. – Київ : НІСД, 2012. – 57 с. – Режим доступу: https://surl.li/ksqjxt. – Дата звернення: 25.10.2025.
2. Ковальов К. Є. Сучасні виклики та загрози для критичної інфраструктури України під час воєнного стану // Приватне та публічне право. – 2025. – № 1. – С. 75–80. DOI: 10.32782/2663-5666.2025.1.12. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://surl.li/ekhwcy. – Дата звернення: 25.10.2025.
3. Суходоля О. М. Стійкість критичної енергетичної інфраструктури та життєдіяльності громад : аналітична доповідь [Електронний ресурс]. – Київ : НІСД, 2024. – 160 с.. – Режим доступу: https://surl.li/twuxuf. – Дата звернення: 25.10.2025.
4. Зелена книга з питань захисту критичної інфраструктури в Україні : збірник матеріалів міжнародних експертних нарад [Електронний ресурс]. – Київ : НІСД, 2016. – Режим доступу: https://surl.lu/jrdtlb. – Дата звернення: 26.10.2025.
5. Бобро Д. Г. Організаційні та правові аспекти забезпечення безпеки та стійкості критичної інфраструктури України : аналітична доповідь [Електронний ресурс] / Д. Г. Бобро, С. П. Іванюта, О. М. Суходоля та ін. – Київ : НІСД, 2019. – Режим доступу: https://surl.li/iepuck. – Дата звернення: 26.10.2025.
6. Гирич О. С. Міжнародний досвід запобігання злочинності у сфері енергетичної безпеки [Електронний ресурс] // Юридичний науковий електронний журнал. – 2024. – № 11. – С. 373–376. DOI: https://doi.org/10.32782/2524-0374/2024-11/86. – Режим доступу: https://surl.li/nhvjdw. – Дата звернення: 26.10.2025.

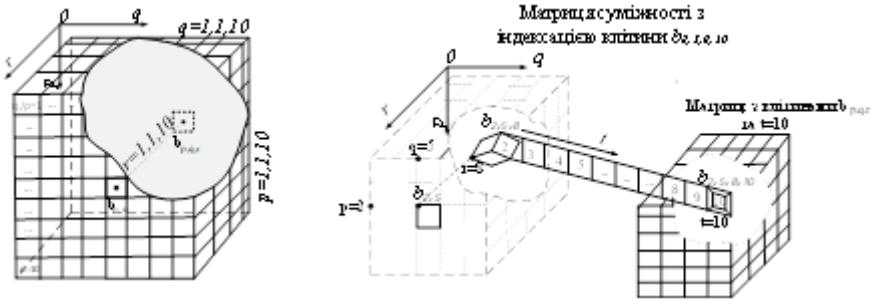
7. Плахотнюк Р. В. Забезпечення стійкості критичної інфраструктури в Україні в умовах сучасних викликів [Електронний ресурс] // Економічний простір. – 2024. – № 195. – С. 47–54. DOI: https://doi.org/10.30838/EP.195.47-54. – Режим доступу: https://surl.li/fqbtwu. – Дата звернення: 27.10.2025.
8. Дорогий Я. Кібербезпека критичної інфраструктури під час військової загрози [Електронний ресурс] / Я. Дорогий, В. Цуркан // Global and Regional Problems of Informatization in Society and Nature Using '2024 : proceedings of the XII International Scientific Online Conference (Kyiv, November 21-22, 2024). – Київ : NULES of Ukraine, 2024. – Режим доступу: https://surl.li/ebmbxp. – Дата звернення: 27.10.2025.
9. Energy Sector [Електронний ресурс] / Cybersecurity and Infrastructure Security Agency (CISA). – Режим доступу: https://surl.li/qlynbj. – Дата звернення: 27.10.2025.
10. Critical Infrastructure Sectors [Електронний ресурс] / Cybersecurity and Infrastructure Security Agency (CISA). – Режим доступу: https://surl.lu/yaavun. – Дата звернення: 27.10.2025.
11. Critical infrastructure and cybersecurity [Електронний ресурс] / European Commission. – 2025. – Режим доступу: https://surl.li/qfvycn. – Дата звернення: 27.10.2025.
12. Office of Energy Infrastructure Security (OEIS) [Електронний ресурс] / Federal Energy Regulatory Commission (FERC). – 2025. – Режим доступу: https://surl.li/thvsdz. – Дата звернення: 28.10.2025.
13. Horyn T. Critical Infrastructure Protection: What It Is and Why It Matters to Utilities [Електронний ресурс] / T. Horyn // Zentera blog. – Режим доступу: https://surl.lu/rsxsam. – Дата звернення: 28.10.2025.
14. Дорогий Я. Ю. Захист критичної інформаційної інфраструктури як національний пріоритет / Я. Ю. Дорогий, І. О. Бердиченко // Міжнародна та національна безпека: теоретичні і прикладні аспекти : матеріали IX Міжнар. наук.-практ. конф. (м. Дніпро, 21 бер. 2025 р.) : у 2 ч. – Дніпро : Дніпров. держ. ун-т внутр. справ, 2025. – Ч. II. – С. 511–513. DOI: 10.5281/zenodo.17358059.
15. Дорогий Я. Ю. Пріоритезація вимог при розробці проектів програмного забезпечення для об’єктів критичної інфраструктури / Я. Ю. Дорогий, О. О. Дорога-Іванюк // Наукові праці ДонНТУ. Сер. : Обчислювальна техніка та автоматизація. – 2024. – Т. 1, № 1(33). – С. 12–28. DOI: 10.5281/zenodo.10451667.

В.С. Волошин, І.В. Ткаленко

МЕТОДИКА ОЦІНКИ ЕФЕКТИВНОСТІ ОПОСЕРЕДКОВАНИХ КОМПЛІМЕНТАРНИХ СИСТЕМ

В якості механізму для аналізу багатокомпонентних структурованих систем візьмемо модель багатовимірної матриці суміжності розмірів $p = 1,1,P$. Вузли матриці $b_{p,q}$ ($q = 1,1,Q$, де $Q = P$) є відображенням двох параметрів – ентропії $S_{p,q}$ та зміни ентропії $\mathbf{\Delta}S_{p,q}$, в даному випадку, для системи, що складається з двох компонентів b_p и b_q. Багатовимірна квадратична матриця суміжності$b_{p,q,r,t,\dots}$ є відображенням структури системи, що складається з $b_{p,q,r,t,\dots} = b_p + b_q + b_r + b_t + \cdots$ компонентів і маючих свої ентропії $S_{p,q,r,t,\dots}$ з відповідними змінами ентропії $\mathbf{\Delta}S_{p,q,r,t,\dots}$, які приводять окремі компоненти $b_{p,(q,r,t,\dots)}$ до системного стану.

Багатокоординатні матриці суміжності, що створюються на підставі сумірних показників, які входять до структури системи, здатні показати досить велику кількість якісних параметрів, які найбільш повно характеризують дану систему. В залежності від кількості вихідних компонентів системи обирається ранг матриці суміжності: двовимірна матриці, наприклад для механічних або хімічних систем, тривимірна та чотиривимірна матриці суміжності – для тих же механічних, енергетичних або біологічних систем (рис. 1), тощо. Такі моделі, де матриці суміжності розширюються до вищих вимірів (наприклад, тензори $b_{p,q,r,\dots}$ для гіперграфів або багатокомпонентних взаємодій) і узагальнюють стандартні матриці суміжності (2D для простих графів) для представлення гіперкравок або багатовимірних зв'язків, подібно до тензорів інциденції в теорії гіперграфів. Цей погляд перетинається з теорією категорій для структурованих систем і статистичною механікою для відображення ентропії [1]. Запропонована багатовимірна матриця суміжності, як механізм аналізу складних систем перевершує у явному представленні взаємодій вищого порядку (наприклад, поза парними через ранг тензорів), що робить її кращою для щільних структурованих систем, де суперпозиція ентропій вимагає багатолінійних операцій — краща за 2D матриці для гіперграфів, із обчислювальними перевагами в аналізі власних значень для стабільності.



а) б)

Рисунок 1. – Варіанти моделі тривимірної (а) та чотиривимірної (б) матриці суміжності для відображення взаємодії між компонентами у багатокомпонентних системах (на прикладі системи, що складається з компонентів $b_2 + b_5 + b_8 + b_{10}$)

Загальна ентропія системи $S_{p,q,r,t,\ldots(total)}$ у цьому випадку обчислюється як суперпозиція деякого числа ентропій, які відносяться до існуючих істотних властивостей системи, зокрема, конфігураційних, теплових та інших, в залежності від сенсу самої системи

$$S_{p,(q,r,t,\ldots)total} = \sum \left[x_{p,(q,r,t,\ldots)} S^{comp}_{p,(q,r,t,\ldots)} + (\Delta S]_{mix} + S_{surf} + S_{conf} + S_{chem} + S_{proc} \right)_{p,(q,r,t,\ldots)} \quad (1)$$

де: $x_{p,(q,r,t,\ldots)}$ — кількісна частка р,$(q, r, t, \ldots)$-го компонента; $S^{comp}_{p,(q,r,t,\ldots)}$ — питома (по молярній масі) ентропія чистого компонента системи при заданих норм. умовах (термодинамічна, як внесок внутрішніх ступенів свободи); ΔS_{mix} — зміна ентропії об'єднання компонентів (ідеал + надлишок); S_{surf} — внесок ступенів свободи на взаємодіючих поверхнях розділу компонентів (залежить від конкретної поверхні, зв'язаних і вільних компонентів); S_{conf} —конфігураційна ентропія взаємного розташування компонентів (структурна неоднорідність, щільність упаковки окремих компонентів) в системі; S_{chem} —ентропійні зміни, пов'язані з хімічними реакціями взаємодії між окремими компонентами системи (розкладання, окислення, відновлення, утворення нових фаз); S_{proc} —процес-кінетичний внесок до системи у вигляді нерівноважних ефектів при деформації, температурній дії (включаючи «похідні ентропії» від розподілу швидкості зміни температури) відносно окремих компонентів системи.

Можливі й інші, не менш актуальні складові повної ентропії в залежності від змісту отриманої системи.

Математичні вирази для поточних складових ентропії викладено у відповідності до робіт [2, 3, 4, 5, 6, 7]. Алгоритм розрахунку наведено на рис. 2.

Ми розглядаємо ентропію системи як показник її невпорядкованості і неорганізованості. З цієї точки зору очевидним результатом є те, що чим нижча ентропія системи, тим більш організованою вона є. Однак якщо врахувати внесок кожної з складових виразності ентропії (1), то картина може бути дещо складнішою, в залежності від змісту самої системи. Абсолютна перевага будь-якого з зазначених або аналогічних складовихну моделі в порівнянні з іншими комплектуючими від S_{total} може по-різному трактувати впорядкованість і організованість системи. Наприклад, для хімічно активної системи S_{chem} при вкрай низких іншихскладових для S_{total} буде матирізніпояснювання рівня організованості та впорядкованості такої системи. Або різкий спад S_{chem} з відносною сталістю інших складових ентропії, але з високим питомим станом в складі S_{total} не буде причиною зростаннявпорядкованостівсієїсистеми.

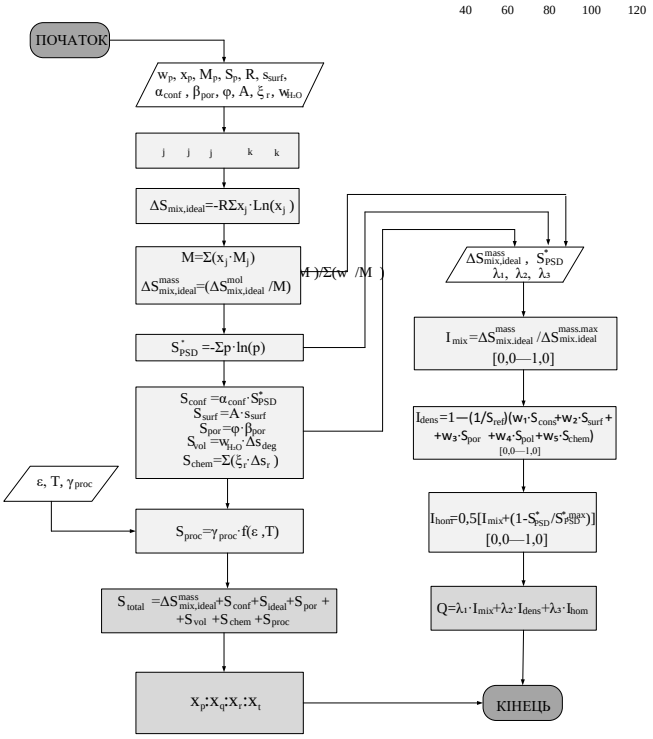


Рисунок 1. – Блок-схема алгоритму розрахунку повної ентропії для багатокомпонентної системи та їїсукупний індекс якості Q

Показником ефективності такої системи в термодинамічних обмірах пропонується агрегований індекс якості Q [0÷ 1]

$$Q = \lambda_1 I_{mix} + \lambda_2 I_{dens} + \lambda_3 I_{hom}, \quad (2)$$

де ваги λ_i складаються до 1, експериментально або експертно. У складі цього показника будемо враховувати наступні індекси:

I_{mix} — позитивна роль ідеальної ентропії змішування $\Delta S_{mix,ideal}$ (чим вище, тим краще хімічна однорідність та можливість реакції) нормалізується до максимально можливої для даного числа компонентів

$$I_{mix} = \frac{\Delta S^{mass}_{mix,ideal}}{\Delta S^{mass,max}_{mix,ideal}}, \quad [0\div 1], \quad (3)$$

де $\Delta S^{mass,max}_{mix,ideal}$ — значення при рівних мольних частках (або при емпіричному максимумі).

I_{dens} — потенціал міцності, щільність обернено залежна від небажаних внесків ентропії:

$$I_{dens} = 1 - \frac{w_1 S_{conf} + w_2 S_{surf} + w_3 S_{por} + w_4 S_{vol} + w_5 S_{chem}}{S_{ref}}, [0\div 1], \quad (4)$$

де w_k — ваги ($\sum [\![\omega_1 k = 1]\!]$) для вкладів; S_{ref} — опорна величина (Дж/(мольК)), так, щоб дріб знаходився в межах [0÷ 1].

I_{hom} — однорідність суміші за хімічним складом і фракціонуванню можна прийняти за середнє значення I_{mix} і нормовано. інверсією PSD-ентропії (для однорідних дрібних компонентів).

$$I_{hom} = 0{,}5\left[I_{mix} + \left(1 - \frac{S^{*}_{PSD}}{S^{*,max}_{PSD}}\right)\right], \quad [0\div 1], \quad (5)$$

При такому тлумаченні можна припустити, що якщо:

- $Q \to 1{,}0$ це означає, що система має високу технологічність;
- $Q < 0{,}5$ означає, що система є проблематичною і вимагає додаткової підготовки для використання.

Подібні моделі знайшли підтримку при аналізі таких складних систем, як створення металургійних брикетів з відходів цієї промисловості, у технологіях створення цементів та цементовмістких сумішах. Наведемо приклад використання моделей багатовимірних матриць суміжності для аналізу механізмів створення геополімерних матеріалів (OPG) у складі основних компонентів із металургійних відходів. Для цього варіанту багатофакторна ентропійна модель має декілька інший вигляд

$$S_{total}(T) = S_{vib}(T) + S_{conf}(T) + S_{mix}(T) + S_{topo}(T) + S_{pore}(T) + S_{sites}(T) + S_{ads}(T) + S_{cat}(T) + \Delta S^{*}_{residual} \quad (6)$$

де присутні додаткові складові ентропії, а саме: S_{vib} — вібраційно-коливальна (теплова) ентропія; S_{topo} — топологічна (мережева) ентропія (розподіл ступенів координації, кластерів); S_{pore} — внесок пористої

структури (розподіл об'ємів пір); S_{sites} — ентропія поверхневих станів (активні центри); S_{ads} — ентропійний внесок від адсорбції (зв'язування) робочих молекул; S_{cat} — ентропія розподілу катіонів; $\Delta S^{*}_{residual}$ — залишкова ентропія конфігурації при T→0 K. Вихідні дані для аналізу наведено в таблиці 1.

Таблиця 1. – Вихідні параметри для термодинамічного розрахунку стану геополімерної системи як активної, в деяких технологіях

Мітка, b_p	Вид и характеристика геополімера	Основні хімічні компоненти	Структурний стан
b_1	З альтернативами портландцементу	SiO_2 (45–55%), Al_2O_3 (20–25%), CaO (15–20%), луги (5–8%)	Аморфний моноліт
b_2	З властивостями поверхні самоскління	SiO_2 (50–60%), Al_2O_3 (15–20%), Na_2O/K_2O(10–15%), TiO_2/ZrO_2 (5%)	Аморфно-кристалічна поверхня
b_3	Геополімери з високим вмістом кальцію	CaO (40–50%), SiO_2 (25–30%), Al_2O_3 (10–15%), MgO (5–8%)	Аморфно-кристалічний моноліт
b_4	Геополімери, що легко змішуються	SiO_2 (40–55%), Al_2O_3 (15–20%), CaO (15–25%), луги (5–8%)	Аморфна суха фаза, гідратація → моноліт
b_5	Однокомпонентні (шлакові) геополімери «on-part»	CaO (30–40%), SiO_2 (30–35%), Al_2O_3 (10–20%), MgO (5–10%)	Аморфна шлакова скловидна структура
b_6	Геополімери з сорбційними властивостями	SiO_2 (50–65%), Al_2O_3 (20–25%), Fe_2O_3 (5–8%), цеоліт. Добавки	Аморфно-кристалічне, сорбційно-активне
b_7	Геополімери з пористою структурою	SiO_2 (45–60%), Al_2O_3 (20–25%), агенти, що спінюють (до 10%)	Клітинна аморфна
b_8	Геополімери з можливостями фільтрувального валу	SiO_2 (50–65%), Al_2O_3 (20–25%), пористість 30–50%	Аморфно-пористі
b_9	Геополімери з імобілізуючими властивостями	SiO_2 (40–55%), Al_2O_3 (20–25%), CaO (10–20%), Fe_2O_3 (5–8%)	Аморфний моноліт, низька пористість
b_{10}	Геополімери для 3D-друку	SiO_2 (45–55%), Al_2O_3 (20–25%), CaO (10–15%), Na_2O/K_2O (5–10%)	Аморфна, тиксотропна паста
b_{11}	Геополімери з вогнетривкими властивостями	SiO_2 (40–55%), Al_2O_3 (20–30%), MgO (5–10%), CaO (5–10%)	Аморфно-кристалічний стан
b_{12}	Самовідновлювальні геополімери	SiO_2 (40–55%), Al_2O_3 (20–25%), CaO (10–15%), Na_2O/K_2O (5–8%), капсульовані $Ca(OH)_2$	Аморфна структура з мікроінкапсуляцією
b_{13}	Геополімер з радіозахистними властивостями	SiO_2 (35–45%), Al_2O_3 (10–20%), BaO (15–30%), PbO (10–20%)	Аморфно-кристаличні вкраплення, висока щільність
b_{14}	«Зелені» геополімериз еко-логічно чистим виробництвом	SiO_2 (40–55%), Al_2O_3 (15–25%), CaO (10–20%), Na_2O/K_2O (5–10%)	Аморфно-монолітна матриця
b_{15}	Високоміцні геополімери	SiO_2 (50–60%), Al_2O_3 (20–30%), CaO (10–15%), Fe_2O_3 (5–8%)	Аморфний моноліт із низькою пористістю
b_{16}	Геополімери з високими ізоляційними здібностями	SiO_2 (50–60%), Al_2O_3 (20–25%), пароутворюючі добавки (10%)	Пориста аморфна структура

Результатом такого аналізу є, наприклад, діаграма профілю ентропії для OPG-затверджувача в координатах інтегральних ентропійних складових. Для геополімерногозатверджувача ефективними показниками є: максимально

високі значення S_{mix} (відображає однорідність матеріалу), збалансоване високе значення S_{conf} (вказує на розвинену мережу зв'язків у структурі), помірні значення S_{topo} і S_{vib} (із зазначенням жорсткості і термічної стійкості) і мінімальні значення порової S_{pore} і адсорбційної S_{ads} ентропій (відповідають за щільність і мінімальну сорбцію). Профіль, показаний у вигляді суцільної лінії, означає ідеальний, щільний, добре перемішаний і стійкий до навантажень OPG-затверджувач.

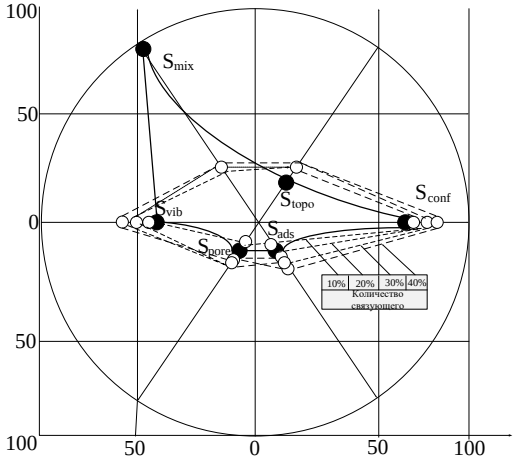


Рисунок 3. – Профіль ентропії (суцільні лінії) ідеального OPG-затверджувача: максимум (однорідність), високий, але не максимальний рівень для S_{mix}, S_{conf}, помірні S_{vib} і S_{topo}, мінімальні S_{pore} і S_{ads}. Пунктирною лінією вказуються параметри і лінії для реального OPG-затверджувача з різною кількістю сполучного, згідно [8]

Показано, що залежно від призначення геополімерів, стану їх ентропійних показників та відповідного індексу якості, диференційованому тлумаченню підлягають властивості геополімерних матеріалів. Там, де ентропії $(S_{mix}, S_{pore}, \quad S_{abs})$ геополімеру досить високі, вони свідчать про високу пористість і низьку щільність матеріалу. Це сприяє зростанню значень інтегральної ентропії, але в той же час споживчий індекс якостітакоє високий. І навпаки, в технологіях, де розрахункова ентропія низька, але потребує високий рівень споживчих якостей, це відповідає щільним, монолітним і міцним конструкційним геополімерним матеріалам з низькою пористістю і високими в'яжучими властивостями. Таке диференційоване розуміння впливу впорядкованості і організованості в структурах геополімерів забезпечує дуже широку палітру його застосування, що

характерно для дуже вузького кола штучних матеріалів, в цілому, і підкреслює специфіку геополімерів як високоефективних продуктів, одержуваних з металургійних відходів.

Як результат аналізу, в роботі показано, що наведені цифри для теоретично обгрунтованого ідеального OPG-затверджувачаз достатньою кореляцією співпадають із наведеними даними в експериментах [8]. При цьому залишається простір для оптимізації за рахунок підвищення S_{mix} і повільного зростання S_{conf} за рахунок оптимізації: підвищення S_{mix} іпомірне зростання S_{conf} за рахунок більш точного підбору рецептури (наприклад, регулювання співвідношення Ca/Si та введення додаткового Al_2O_3).

Таким чином, запропонована методика надає можливостей для широкооглядного і досить конкретного аналізу певного кола структурованих ієрархічних систем, у залежності від завдань, що ставляться перед цими системами.

1. Godsil C., Royle G.F. Algebraic Graph Theory.Springer, Graduate Textsin Mathematics, 2001, NY, P. 45-50.
2. BrownT.E., LeMay H.E., Bursten B.E., Murphy C., Woodward P., Stoltzfus M.W., Lufaso M.W. Chemistry: The Central Science. Pearson Education, 14-ect, Hoboken, NJ, 2018, P. 812-815.
3. Atkins P.W., dePaula J., Atkins' Physical Chemistry. Oxford University Press, 11-th, Oxford, UK, 2018, P. 142-145.
4. Miracle D.B., Senkov O.N. A critical review of highentropyal loysandre lated concepts. Acta Materialia, Elsevier, 2017, Oxford, UK, P. 448-511.
5. Widom B., Statistical Mechanics: A Concise Introduction for Chemists. Cambridge University Press, 2002, Cambridge, UK, P. 78-82.
6. Levine I.N. Physical Chemistry, McGraw-Hill Education, 6-th, NY, 2009, P. 156-160.
7. Kondepudi D., Prigogine I. Modern Thermodynamics: From Heat Enginesto Dissipative Structures, Wiley, Chichester, UK, 2015, P. 345-350.
8. Shuo Li, Zihan Zhou, Guo Hu, Chuanqin Yao, Fujun Niu. Jun Wu Using One-Part Geopolymerin Stabilizing High-Water-Content Soft Clay: Towardsan Eco-Friendly and Cost-Effective Solution. *Buildings*, T.5, Vol. 3, 2025. P. 477-501.

G.P. Kostenko

ANALYSIS OF OPEN LI-ION BATTERY DATASETS FOR KPI-BASED MODELING AND LIFECYCLE MANAGEMENT

The increasing demand for data-driven energy analytics, predictive maintenance, and circular battery management has placed public battery datasets at the core of advanced modeling and decision-making. Particularly in the context of second-life battery (SLB) deployment and Virtual Power Plant (VPP) integration, the availability of high-quality experimental data is essential for building reliable degradation models, estimating Key Performance Indicators (KPIs), and optimizing control strategies [1].

However, despite a growing number of open datasets released by research laboratories and academic institutions, the landscape remains fragmented. Differences in data structure, measurement scope, cycling conditions, and metadata depth make it difficult to compare results or derive standardized models. Moreover, aspects such as data integrity, licensing restrictions, and digital safety are often overlooked in battery analytics but become crucial when results are integrated into energy systems or regulatory frameworks.

This study provides an analytical review of widely cited, open-access battery datasets, primarily focusing on NMC, LFP, and NCA chemistries - the dominant cell types in EV and second-life applications [2]. We evaluate each dataset against a set of technical and usability parameters and classify them into usage scenarios. The goal is to support informed dataset selection for KPI-based modeling, lifecycle analysis, and adaptive control design in real-world applications.

Overview of Open Battery Datasets

Numerous research laboratories have conducted long-term experiments on lithium-ion battery cells under controlled conditions to evaluate their performance, aging behaviour, and degradation pathways [3-17]. The resulting public datasets, summarized in Tab.1, vary in chemistry, form factor, depth of cycling, and measurement detail, offering diverse opportunities for KPI-based modeling and lifecycle analysis.

Table 1. – Summary of Selected Public Li-ion Battery Datasets (NMC/LFP/NCA)

Dataset	**Institution**	**Cells**	**Form Factor**	**Chemistry**	**Year**	**Ref.**
PCoE Battery Dataset	NASA Ames	34	18650	NCA	2008–2010	[3]
Randomized Battery Usage Dataset	NASA Ames	26	18650	LCO	2014	[4]

CALCE CS2 Dataset	Univ. of Maryland	15	Prismatic	LCO	2010–2013	[5]
Cycle Life Prediction Dataset	Stanford University	135	18650	LFP	2017–2018	[6]
Fast-Charging Optimization Dataset	Stanford University	230	18650	LFP	2018–2019	[7]
Synthetic Diagnosis Dataset	MIT / Univ. of Hawaii	–	Simulated	LFP	2020	[8]
Dataset	**Institution**	**Cells**	**Form Factor**	**Chemistry**	**Year**	**Ref.**
Sandia Short-Term Dataset	Sandia Labs	24	18650	LCO, LFP, NCA	2017	[9]
Long-Term Degradation Dataset	Sandia Labs	86	18650	NMC, NCA, LFP	2018-2020	[10]
HNEI Dataset	Univ. of Hawaii	15	18650	NMC-LCO	2013-2014	[11]
Oxford Battery Degradation Dataset	Oxford University	8	Pouch	NMC	2015	[12]
Panasonic 18650PF Dataset	Univ. of Wisconsin	1	18650	NCA	2016	[13]
Automotive Usage Dataset	Argonne NL / Ford	1	Pouch	NMC	2018	[14]
Stanford SLB Dataset (Moy, 2024)	Stanford University	6	21700	NMC	2024	[15]
Second-Life Electric Vehicle Battery Microgrid Dataset	Univ. of Agder / SINTEF (Norway)	n/a	Rack/pack	LFP	2019-2021	[16]
PulseBat Dataset	University of Twente /TNO(NL)	464	mixed	NMC, LFP, LCO	2024	[17]

Key Observations and Data Integrity Aspects

The reviewed datasets show clear trends in chemistry focus, modeling applicability, and data quality. Most experimental studies target NMC and LFP chemistries, reflecting their dominance in modern EV batteries. NCA appears less often but is included in Sandia and Panasonic sets. Older datasets from NASA and CALCE focus on LCO, which has limited relevance for current high-power

applications. Selecting an appropriate dataset depends on matching the chemistry to the intended model or use case.

Only a few datasets, such as Stanford Cycle Life, Sandia Long-Term, and HNEI, include sufficient cycling depth (typically >1000 full cycles) to support robust Remaining Useful Life (RUL) modeling. These offer stable lab conditions and long-term tracking essential for predictive algorithms. Others, focused on short-term or pulse testing, are less suitable for life expectancy estimates.

Second-life applications remain underrepresented. Only Stanford SLB and parts of the Sandia study explicitly simulate operational modes like partial cycling, calendar aging, and peak shaving. These datasets support KPI extraction for reuse strategies, while most others assume primary-use EV profiles.

Metadata completeness is a persistent issue. Many datasets lack full test protocol details (DOD, rest periods, temperature control), limiting reproducibility and KPI calculation. Stanford and Sandia sets typically include well-documented procedures; legacy NASA datasets do not.

Finally, only a few datasets support traceable, secure integration into digital platforms. Formal versioning, DOIs, or integrity checks are rarely present, complicating validation in digital twin frameworks or regulatory settings such as the EU Battery Passport. Broader standardization in battery data publication is urgently needed.

Dataset Selection Guide by Analytical Use Case

In addition to chemistry and measurement structure, the analytical value of each dataset depends on the specific research task it enables. Table 2 organizes the reviewed datasets by modeling context, ranging from cycle life prediction and degradation mechanism analysis to second-life feasibility and dispatch optimization. A particular emphasis is placed on applications involving renewable energy sources (RES), such as photovoltaic and wind systems, where batteries play a critical role in smoothing fluctuations, reducing curtailment, and enabling time-shifted dispatch. For these use-cases, datasets must support variable-depth cycling, partial charge/discharge regimes, and temperature sensitivity - conditions that mimic real-world operation under intermittent generation.

Table 2. – Matching Battery Datasets to Modeling Objectives

Research Task / Modeling Goal	**Recommended Datasets**	**Notes**
1. Cycle life prediction	Stanford Cycle Life, HNEI, Sandia Long-Term, NASA PCoE	Large number of cycles, consistent protocols, suitable for RUL/LCOS modeling
2. KPI-based performance tracking (SoH, LCOS proxy)	Stanford SLB, Sandia Long-Term, Oxford, NASA Randomized Usage, PulseBat	KPI extraction possible due to full-cycle logging and metadata
3. Fast-charging impact analysis	Stanford Fast-Charging, MIT TRI, Oxford	High-speed charge protocols with clear cycle outcome
4. Second-life	Stanford SLB, HNEI,	SLB duty cycles or partial

feasibility assessment	Sandia Long-Term, SINTEF, PulseBat	DOD, calendar+cycling aging
5. Drive profile degradation	Stanford Pozzato, Oxford EV, Panasonic, SINTEF	Realistic driving cycles (UDDS, LA92) with full voltage/current logs
6. Model calibration for Digital Twin	Stanford Cycle Life, HNEI, NASA PCoE, MIT synthetic	Clean continuous logs; multiple degradation mechanisms represented
7. Degradation mechanism separation (LLI/LAM)	MIT Synthetic, NASA PCoE, Sandia Short-Term	Includes EIS, internal resistance, or simulated separation of mechanisms
8. Material-specific benchmarking (NMC vs LFP vs NCA)	Sandia Short-Term, Stanford Galvanostatic, HNEI	Cross-chemistry format allows fair comparison
9. Battery dispatch optimization in grid scenarios	Stanford SLB, Stanford Fast-Charging, Sandia Long-Term, SINTEF, PulseBat	Datasets support development of dispatch rules based on SOH/efficiency/temperature
10. Validation of SOH/RUL models	Stanford Cycle Life, MIT synthetic, Sandia Long-Term, NASA PCoE	Common benchmark sets; used in Nature / IEEE studies
11. Battery performance in RES-linked scenarios (PV/Wind)	Stanford SLB, HNEI, Sandia Long-Term, MIT synthetic	Suitable for modeling smoothing, peak shaving, daily dispatch in solar/wind-coupled systems

Conclusions:

Public datasets play a foundational role in developing predictive battery models and calculating key performance indicators relevant to both first- and second-life use.

This study summarized the most widely used open-access battery datasets and classified them by chemistry, structure, and use-case relevance. Stanford (2022–2024), Sandia (BatteryArchive), and HNEI provide the most consistent aging data, suitable for KPI extraction (efficiency, LCOS proxy, utilization rate) and second-life modeling.

These datasets are particularly valuable for enabling secure, reproducible, and regulation-ready KPI modeling across the full battery lifecycle.

1. Kostenko, G., Zaporozhets, A., Babak, V., Uruskyi, O., Titko, V., Denisov, V. (2025). Second-Life EV Batteries Application in Energy Storage Systems for Sustainable and Resilient Power Sector. In: Systems, Decision and Control in Energy VII, vol 595. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-90466-0_1.
2. Bosak A., Kostenko G., Zaporozhets A. Electric Vehicle Battery Type Suitability in V2L Applications to Enhance Grid Load Flexibility: A Comparative Study // Power Engineering: economics, technique, ecology. - 2025. - No. 3 (81). - DOI: https://doi.org/10.20535/1813-5420.3.2025.339751.
3. PCoE Battery Dataset (NASA Ames) - URL: https://phm-

datasets.s3.amazonaws.com/NASA/5.+Battery+Data+Set.zip (NASA PCoE Prognostics Data Repository.

4. Randomized Battery Usage Dataset (NASA) - URL: https://phm-datasets.s3.amazonaws.com/NASA/11.+Randomized+Battery+Usage+Data+Set.zip
5. CALCE CS2 Dataset (University of Maryland) - URL: https://calce.umd.edu/battery-data (CALCE “Battery Data” page).
6. Cycle Life Prediction Dataset (Stanford) - URL: https://github.com/rdbraatz/data-driven-prediction-of-battery-cycle-life-before-capacity-degradation.
7. Fast-Charging Optimization Dataset (Stanford) - URL: https://data.matr.io/1/#projects/5d80e633f405260001c0b60a.
8. Synthetic Diagnosis Dataset (Graphite//LFP) - URL: https://data.mendeley.com/datasets/bs2j56pn7y/1 (Mendeley Data).
9. Sandia Short-Term Dataset - URL: https://www.sandia.gov/app/uploads/sites/163/Sandia_Cell_Cycle_Testing_Data.zip
10. Sandia Long-Term Degradation Dataset - URL: https://www.batteryarchive.org/snl_study.html.
11. HNEI Dataset (Hawaii) - URL: https://www.batteryarchive.org/ (search for “HNEI” study).
12. Oxford Battery Degradation Dataset - URL: https://ora.ox.ac.uk/objects/uuid:03ba4b01-cfed-46d3-9b1a-7d4a7bdf6fac (Oxford University Research Archive).
13. Panasonic 18650PF Dataset (UW–Madison) - URL: https://data.mendeley.com/datasets/wykht8y7tg/1.
14. Automotive Usage Dataset (Argonne/Ford) - DOI: 10.21227/ce9q-jr19.
15. Stanford SLB Dataset (Moy et al. 2024, OSF) – URL: https://osf.io/8jnr5/.
16. Second-Life Electric Vehicle Battery Microgrid Dataset - https://data.mendeley.com/datasets/mmrz3njn6b/2.
17. PulseBat Dataset (2024) - Url: https://github.com/terencetaothucb/Pulse-Voltage-Response-Generation.

В.В. Станиціна

ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНИХ ПОКАЗНИКІВ ТРАДИЦІЙНИХ СЕС ТА СЕС З СИСТЕМАМИ НАКОПИЧЕННЯ ЕНЕРГІЇ

У світі та в Україні зростає кількість сонячних електростанцій із системами накопичення енергії (СЕС–СНЕ), що зумовлено потребою балансування ВДЕ, підвищення надійності живлення та можливістю автономної роботи. СНЕ суттєво підвищують керованість СЕС, але збільшують собівартість енергії. Традиційні СЕС працюють без локальних систем зберігання, покладаючись на балансування енергосистеми, проте їхня роль і обмеження стали більш помітними на тлі зростання частки ВДЕ. До 2022 р. встановлена потужність СЕС в Україні досягла 6 ГВт з 8 ГВт відновлюваних потужностей, на кінець 2023 року сумарна потужність ВЕС і СЕС становила близько 9 ГВт, з яких 7 ГВт СЕС, але приблизно 2,3 ГВт із них опинилися на окупованих територіях. У 2024 р. було додано 800–850 МВт нових СЕС, частина яких з СНЕ [1-2], що підкреслює стійкий інтерес до децентралізованої генерації та актуальність переходу до СЕС–СНЕ.

Одними з основних техніко-економічних показників є питомі капітальні витрати та середньозважена собівартість електроенергії за життєвий цикл (LCOE).

Для порівняння економічної ефективності було розглянуто три конфігурації сонячної електростанції потужністю 100 кВт: традиційну мережеву та дві з акумуляторними батареями потужністю 50 кВт та 100 кВт. Аналіз проведено для умов північного та південного регіонів України з різним рівнем сонячної інсоляції (1100 та 1400 кВт·год/м² відповідно), що дозволило оцінити вплив як технології, так і географічного розташування.

Результати розрахунків показали, що встановлення АБ потужністю 50 та 100% від номіналу СЕС підвищує капітальні витрати проєкту на 160 та 270%. Це безпосередньо збільшує LCOE: для СЕС на півночі України собівартість зростає у 2,6 раза за наявності АБ 50 кВт та у 3,7 раза для АБ 100 кВт за ставки дисконту 10%.

Зі збільшенням ставки дисконту з 10% до 15% LCOE для всіх типів СЕС зростає в середньому на 35%, а подальше підвищення до 20% збільшує собівартість ще на 25–30%. Це означає, що проєкти з високою часткою капітальних витрат, зокрема СЕС з АБ, є особливо чутливими до вартості капіталу: що більша частина витрат припадає на інвестиційну складову, то сильніше зростає LCOE при підвищенні ставки дисконту. Додатково результати демонструють істотну різницю між південними та північними регіонами України, зумовлену різною інсоляцією. Для традиційних СЕС LCOE на півночі приблизно на 27% вище, ніж на півдні; для СЕС з АБ різниця зберігається на подібному рівні. Це пояснюється тим, що за

однакових капітальних витрат південні СЕС виробляють на 20–25% більше електроенергії, що суттєво знижує приведену собівартість. Таким чином, одночасний вплив ставки дисконту та розташування формує відчутні відмінності в економічній ефективності проєктів, а СЕС з АБ, маючи високу інвестиційну складову, стають особливо залежними від цих факторів.

Порівняння розрахованого LCOE українських СЕС із даними IRENA [3] показує, що лише традиційні СЕС, розташовані на півдні України та розраховані за ставкою дисконту 10%, наближаються до глобального середнього значення 0,044 дол./кВт·год.

Для СЕС-СНЕ важливо враховувати зміну корисного відпуску електроенергії та загальної системної цінності таких установок. Обсяг електроенергії, що реально передається споживачу, залежить не лише від характеристик сонячної генерації, а й від додаткових факторів: втрат у циклах заряд-розряд акумулятора, можливого зменшення диспетчерських обмежень у денні години, перенесення частини виробітку на періоди пікового попиту з вищою ціною, а також впливу режимів експлуатації на довговічність і деградацію батарей. Унаслідок цього оцінювання гібридних СЕС лише за показником LCOE є недостатнім, і до аналізу необхідно включати LCOS - собівартість зберігання енергії, що відображає реальні витрати та ефективність використання накопичувача.

Крім зміни структури виробітку, СЕС з акумуляторами отримують додаткові економічні можливості, зокрема надання швидкодіючого резерву, участь у регулюванні частоти, зменшення небалансів, видачу потужності за командами оператора та здатність працювати автономно у режимі мікромережі. Саме тому такі гібридні системи доцільно порівнювати не з традиційними СЕС, а з іншими керованими технологіями швидкого маневрування - газотурбінними та газопоршневими установками, автономними батарейними станціями, гібридними міні-ГЕС та іншими джерелами, здатними миттєво збільшувати видачу електроенергії до мережі.

1. Частка ВДЕ у глобальному електробалансі сягнула 30% (за матеріалами звіту Ember). 13.05.2024 р. URL: https://ua-energy.org/uk/posts/chastka-vde-u-hlobalnomu-elektroenerhetychnomu-balansi-siahnula-30.
2. У 2024 році частка ВДЕ в енергобалансі України склала майже 11%. *Екополітика*. 25 Лютого 2025. URL: https://ecopolitic.com.ua/ua/news/u-2024-roci-chastka-vde-v-energobalansi-ukraini-sklala-majzhe-11/.
3. Patrick Jowett. Global average solar LCOE stood at $0.044/kWh in 2023, says IRENA. September 27, 2024. URL: https://www.pv-magazine.com/2024/09/27/global-average-solar-lcoe-stood-at-0-044-kwh-in-2023-says-irena/.

О.А. Владимирський, В.М. Зварич, І.А. Владимирський, В.О.Артемчук

ДЕЯКІ ПИТАННЯ ВИКОРИСТАННЯ ЯДЕР ВИПАДКОВИХ ПРОЦЕСІВ З ДИСКРЕТНИМ ЧАСОМ ДЛЯ ДІАГНОСТИКИ ЕНЕРГЕТИЧНОГО ОБЛАДНАННЯ

Оцінка надійності роботи електротехнічного обладнання приймає особливе значення в повоєнний період. Для надійної роботи електростанції важливе безперебійне функціонування не тільки її основного обладнання, але і обладнання власних потреб, включаючи трубопроводи [1-3]. Для вирішення цієї проблеми необхідно мати надійні системи моніторингу та діагностики такого обладнання. Розробкою подібних систем займаються такі компанії як Brüel&Kjær, PCB, SPM, Deriton, BentlyNevada, Timken, виробники крупного електротехнічного обладнання – Siemens, ABB, розробники і виробники діагностичної апаратури для систем водо- та теплопостачання та HWM-WaterLtd, PrimayerLimited, GuidedUltrasonicsLtd. (Великобританія), SebaKMT, HermanSewerinGmbH. (Німеччина), FluidConservationSystems (США), Gutermann (Швейцарія), інш.

Для побудови розв′язувальних правил діагностики вузлів енергетичного обладнання пропонується використовувати ядра лінійних випадкових процесів. Причому така процедура передбачає можливість побудови розв′язувальних правил у випадку, коли інформаційні сигнали описуються різними типами лінійних випадкових процесів, наприклад AR та ARMA.

Системи технічної діагностики енергетичного устаткування досить різноманітні і базуються на різних методах. Це - тепловий контроль і діагностика, контроль технічного стану на основі аналізу електричних і магнітних полів, вібродіагностика, акустична діагностика, діагностика на основі методів акустичної емісії тощо.

Показники надійності роботи енергообладнання визначаються результатом спільного впливу як факторів, що визначають умови експлуатації, так і внутрішніх чинників, що визначають властивості енергетичного обладнання. Поєднання таких факторів носить випадковий характер. Тому застосування статистичних методів для вирішення таких завдань доцільно в багатьох практичних випадках.

Лінійні випадкові процеси знаходять все більше застосування при вирішенні завдань виділення (детектування) та класифікації інформаційних сигналів у радіотехніці, геофізиці, вібродіагностиці, біомедичних дослідженнях. Важливим завданням застосування лінійних випадкових процесів у програмах є розробка методів класифікації таких процесів та їх використання в задачах діагностики електротехнічного обладнання [1,2,4]

Розглянемо деякі підходи (методи) для побудови розв′язувальних правил, які можна застосувати при використанні лінійних випадкових процесів авторегресії як математичної моделі інформаційних сигналів.

Лінійним процесом авторегресії (AR) називається процес який можна задати наступним чином:

$$\xi_t + a_1\xi_{t-1} + \ldots + a_p\xi_{t-p} = \varsigma_t, \tag{1}$$

де $a_1,\ldots,a_p$ - параметри авторегресії; p - порядок авторегресії; ς_τ - породжуючий процес ξ_t. Для лінійних (AR) процесів, породжуючий процес є процесом з незалежними значеннями, що має безмежно подільний закон розподілу.

Якщо корені характеристичного рівняння:

$$\Psi(z) = a_p + a_{p-1}z + \ldots + a_1 z^p, \tag{2}$$

лежать усередині одиничного кола, рівняння має єдине стаціонарне рішення

$$\xi_t = \sum_{\tau=0}^{\infty} \varphi(\tau)\varsigma_{t-\tau} \tag{3}$$

Ядро $\{\varphi(\tau), \tau \in Z\}$ пов'язане з параметрами авторегресії $\{a_j,\ j=\overline{1,p}\}$ рекурентними співвідношеннями [1,2,4]:

$$\varphi_{AR}(k) = \begin{cases} 0 & k<0 \\ 1 & k=0 \\ \sum_{\tau=1}^{k} a_\tau \varphi_{AR}(k-\tau) & k=\overline{1,p-1}, \\ \sum_{\tau=1}^{p} a_\tau \varphi_{AR}(k-\tau) & k=\overline{p,p+1}, \end{cases} \tag{4}$$

Передбачається, що $\varphi(0)=1; \quad \sum_{\tau=0}^{\infty} \left|\varphi(\tau)\right|^2 < \infty$

При використанні параметрів авторегресії в якості інформативних ознак в задачах діагностики технічного стану технічних об'єктів, розв′язувальні правила можна побудувати в багатовимірних просторах. Таку задачу вібродіагностики вузлів енергетичного обладнання та побудову розв′язувальних правил у багатовимірних діагностичних просторах розглянуто у роботах [1,5].

Як показано в роботі [6] можна побудувати міру різниці між стаціонарними процесами авторегресії а також між гільбертовими стаціонарними та оберненими [7] процесами використовуючи ядра таких процесів. Така міра визначається відстанню $d[\xi_1(t),\xi_2(t)]$, яку можна визначити таким чином:

$$d[\xi_1(t),\xi_2(t)]=\sqrt{\sum_{\tau=0}^{\infty}\left(\varphi_{\xi 1}(\tau)-\varphi_{\xi 2}(\tau)\right)^2}\ , \qquad (5)$$

де $\varphi_{\xi 1}(\tau)$ - ядро лінійного стаціонарного процесу авторегресії $\xi_1(t)$, $\varphi_{\xi 2}(\tau)$- ядро лінійного стаціонарного процесу авторегресії $\xi_2(t)$. Зазначимо, що таким чином можна побудувати розв′язувальні правила для лінійних процесів авторегресії, що мають різний порядок авторегресії, а також побудувати розв′язувальні правила для процесів авторегресії та процесів ковзного середнього. Відповідно до [6], функція $d[\xi_1(t),\xi_2(t)]$ завжди існує і задовольняє властивостям функції відстаней тобто, вона позитивна, існує нульовий елемент і має місце нерівність трикутника.

В доповіді розглянуто приклад використання такого методу діагностування, де в якості вузла, що діагностується, вибрано підшипниковий й вузол електричної машини.

1. Zvaritch V.N., Myslovych M.V., Gyzhko Y.I. (2021) Application of Linear Random Processes to Construction of Diagnostic System for Power Engineering Equipment. In: Dolgui A., Bernard A., Lemoine D., von Cieminski G., Romero D. (eds) Advances in Production Management Systems. Artificial Intelligence for Sustainable and Resilient Production Systems. APMS 2021. IFIP Advances in Information and Communication Technology, 630, part 1, 617-622, Springer, Cham.
2. Гижко, Ю. Зварич, В. Особливості побудови компонентів багаторівневих експертних систем вібродіагностики вузлів електротехнічного обладнання з урахуванням використанням бездротових блоків зв′язку. *Технічна електродинаміка*. 5 (2024), 094. https://doi.org/10.15407/techned2024.05.094.
3. Владимирський О.А., Владимирський І.А. Просторовий і частотний Кореляційні параметричні методи визначення координат витоків підземних трубопроводів. Електронне моделювання. 2021. 43 (4). С.22-36.URL:https://doi.org/10.15407/emodel.43.04.022.
4. Zvaritch V., ”Some Singularities of Linear AR Processes Characterization in Applied Problems of Power Equipment and Power Systems Diagnosis”, In: Kyrylenko, O., Denysiuk, S., Strzelecki, R., Blinov, I., Zaitsev, I., Zaporozhets, A. (eds) Power Systems Research and Operation. Studies in Systems, Decision and Control, vol 512. Springer, Cham, 2024. DOI: 10.1007/978-3-031-44772-3_12.
5. BabakV.P., BabakS.V., MyslovychM.V., ZaporozhetsA.O., ZvaritchV.M. Diagnostic Systems For Energy EquipmentsPart of the Studies in Systems, Decision and Control book series (SSDC, volume 281)- Erfurt: Springer Nature, (Switzerland), 2020. - 133 p. DOIhttps://doi.org/10.1007/978-3-030-44443-3.
6. Triacca U. Feedback causality and distance between ARMA models. Mathematical and Computing in Simulation, 2004, vol. 64, pp. 679-685.
7. Андерсон Т. Статистический анализ временных рядов, М.: Мир, 1976.-755.

А.О. Кримська

ВИКОРИСТАННЯ ТЕХНОЛОГІЙ ШТУЧНОГО ЗОРУ ДЛЯ КОНТРОЛЮ СТАНУ ЕНЕРГЕТИЧНОГО ОБЛАДНАННЯ В АВТОМАТИЧНОМУ РЕЖИМІ

Упродовж останніх років технології штучного інтелекту (ШІ) та машинного зору активно впроваджувалися в системи моніторингу енергетичного обладнання, забезпечуючи автоматичний контроль його технічного стану. Значна кількість дослідників вивчала цю тему та виділяла різні погляди щодо неї.

Наприклад, Afridi et al. здійснили огляд методів прогнозного обслуговування відновлюваних енергетичних систем, зосередившись на використанні ШІ для виявлення несправностей до їх виникнення. Вони відзначили основні виклики, такі як якість даних, інтерпретованість моделей і безпека, що були критичними для впровадження ШІ в енергетиці. Дослідники наголосили на потребі уніфікації даних і створення відкритих наборів даних для покращення точності прогнозів, акцентували на важливості розроблення адаптивних моделей, здатних до самонавчання в умовах змінного середовища [1].

Ageed et al. розглянули інтелектуальні системи енергетичного моніторингу, підкреслюючи важливість нейронних мереж у виявленні аномалій та оптимізації енергоспоживання, обговорили застосування таких систем у різних сферах, включно з вуличним освітленням і промисловими об’єктами. Автори вказали на потребу інтеграції інтелектуальних систем із наявними інфраструктурами для забезпечення безперервного моніторингу. Звернули увагу на потенціал використання хмарних технологій для зберігання та аналізу великих обсягів даних [2].

Baduge et al. зосередилися на застосуванні ШІ та машинного зору в будівництві, зокрема в моніторингу стану конструкцій та управлінні будівельними процесами. Було підкреслено потенціал глибокого навчання у виявленні дефектів і прогнозуванні зносу матеріалів. Дослідники приділили увагу використанню безпілотних літальних апаратів для збирання візуальних даних у реальному часі та наголосили на важливості розроблення стандартів для забезпечення сумісності між різними системами моніторингу [3].

Fan et al. дослідили технології моніторингу зварювання на основі машинного зору, акцентуючи на важливості точного виявлення дефектів швів для забезпечення якості з’єднань. Було наголошено на викликах, пов’язаних із шумами в зображеннях та обмеженими обчислювальними ресурсами. Автори запропонували використання комбінованих методів оброблення зображень для підвищення точності виявлення дефектів. Також було підкреслено потребу розроблення спеціалізованих алгоритмів для оброблення зображень у складних умовах виробництва [4].

Gültekin et al. запропонували систему реального часу для виявлення несправностей і моніторингу стану промислових автономних транспортних засобів, використовуючи периферійний ШІ. Вони інтегрували відкриту платформу FIWARE для забезпечення ефективного обміну даними та швидкого реагування на виявлені проблеми. Система продемонструвала значне зниження вимог до пропускної здатності мережі та часу передавання даних. Дослідники відзначили можливість масштабування системи для моніторингу флоту обладнання в реальних виробничих умовах [5].

Огляд візуальних технологій і методів аналізу для виявлення та характеристики дефектів у фотоелектричних модулях великих сонячних електростанцій здійснили Høiaas et al. У дослідженні розглянуто такі методи, як інфрачервона термографія, електролюмінесценція, фотолюмінесценція та ультрафіолетова флуоресценція, зосереджуючись на їхній ефективності, простоті впровадження та сумісності з безпілотними літальними апаратами для дистанційного збирання даних.

Автори наголосили на важливості інтеграції цих візуальних технологій з іншими методами моніторингу для підвищення точності діагностики. Зазначено про потребу стандартизації процедур інспектування для забезпечення порівнянності результатів. Огляд підкреслює перспективи використання безпілотних літальних апаратів для автоматизованого збирання візуальних даних, що може сприяти ефективному та надійному виробництву електроенергії на великих сонячних електростанціях. Це дослідження заклало основу для подальшого розвитку технологій візуального моніторингу в галузі сонячної енергетики [6]. Крім того, Krymska та Ponomarenko досліджували роль інформаційних технологій у підвищенні ефективності енергетичних систем України. У статті вони проаналізували сучасні ІТ-рішення, які сприяють автоматизації процесів управління енергоспоживанням, зменшенню втрат енергії та покращенню стабільності енергосистем. Також автори розглянули перспективи впровадження цифрових платформ для моніторингу та оптимізації роботи енергетичних об’єктів [7].

Liang et al. досліджували застосування комп’ютерного зору для автоматизованого моніторингу й обслуговування енергетичного обладнання, акцентуючи на потенціалі глибокого навчання у виявленні аномалій і прогнозуванні несправностей. Було виявлено переваги використання глибокого навчання для виявлення аномалій і прогнозування несправностей. Автори також акцентували на викликах, пов’язаних з обробленням великої кількості даних і потребою високої точності моделей [8].

Luo et al. розробили методологію для автоматичного визначення повної позиції будівельної техніки за допомогою комп’ютерного зору і глибокого навчання. У дослідженні було використано глибокі нейронні мережі, такі як Stacked Hourglass Network (HG) і Cascaded Pyramid Network (CPN), а також їхню комбінацію для точного визначення основних точок техніки на будівельних майданчиках. Результати продемонстрували високу точність і

швидкість виявлення, що свідчить про ефективність запропонованого підходу в реальному часі. Це дослідження заклало основу для застосування комп'ютерного зору і глибокого навчання в повному оцінюванні позиції будівельної техніки, що може сприяти підвищенню безпеки й ефективності будівельних процесів [9].

Ranyal et al. здійснили всебічний огляд систем моніторингу стану доріг, які використовують інтелектуальні сенсори та штучний інтелект. У дослідженні вони проаналізували сучасні методи виявлення пошкоджень дорожнього покриття за допомогою візуальних технологій, зокрема комп'ютерного зору і глибокого навчання. Огляд охоплював період із 2017-го до 2022 року й передбачав аналіз використання різних сенсорів, таких як RGB-камери, тепловізори, лазери та георадарні системи, інтегрованих у смартфони, дрони й транспортні засоби. Дослідники наголосили на важливості точного і своєчасного виявлення дефектів для забезпечення безпеки дорожнього руху й акцентували на потенціалі інтеграції цих систем з іншими інфраструктурними технологіями [10].

Vo et al. надали огляд інтелектуальних систем для аквакультури, зосередившись на застосуванні машинного навчання та комп'ютерного зору для автоматизації процесів у рибництві. У дослідженні було проаналізовано методи вимірювання розміру та ваги риби, класифікації видів, виявлення хвороб, а також автоматизованого годування та моніторингу якості води. Огляд охоплював 100 наукових робіт, опублікованих протягом останніх 10 років, що свідчить про глибину й актуальність дослідження.

Автори наголосили, що впровадження цих технологій може значно підвищити ефективність і стійкість аквакультурних систем, зменшити трудові витрати та мінімізувати вплив на довкілля. Також було проаналізовано виклики, пов'язані з масштабуванням цих рішень у промислових умовах, включно з потребою у стандартизації даних, інтеграції з наявними інфраструктурами та забезпеченні точності моделей [11].

У сучасному енергетичному секторі автоматичний контроль стану обладнання набуває все більшої актуальності. Однією з головних технологій, що забезпечує ефективний моніторинг і діагностику, є штучний зір. Зазначена технологія поєднує високоточні камери, сенсори й алгоритми оброблення зображень, що дає можливість виявляти дефекти, зношення, перегрівання та інші аномалії в роботі обладнання без потреби зупинення процесів або втручання людини.

Штучний зір застосовують у різних сегментах енергетики. У сонячній енергетиці, наприклад, його використовують для моніторингу фотоелектричних модулів. За допомогою інфрачервоної термографії та електролюмінесценції можна виявляти мікротріщини, деградацію матеріалів та інші дефекти, що впливають на ефективність генерації електроенергії. Використання безпілотних літальних апаратів із вбудованими камерами дає можливість швидко й ефективно обстежувати великі площі сонячних панелей, зменшуючи витрати часу та ресурсів. У вітроенергетиці штучний

зір застосовують для контролю стану лопатей вітрових турбін. Виявлення тріщин, ерозії або інших пошкоджень на ранніх стадіях дає можливість запобігти серйозним аваріям і продовжити термін служби обладнання.

Крім того, системи штучного зору можуть аналізувати вібрації та інші параметри роботи турбін, що сприяє точнішому прогнозуванню можливих несправностей. У тепловій енергетиці й на електростанціях штучний зір застосовують для моніторингу стану котлів, турбін, генераторів та інших критичних компонентів. Системи можуть виявляти перегрівання, корозію, витоки й інші проблеми, що дає можливість своєчасно здійснювати технічне обслуговування та запобігати аваріям.

Важливою перевагою штучного зору є можливість інтеграції з іншими системами моніторингу й управління. Наприклад, поєднання із системами Інтернету речей (IoT) дає змогу створювати комплексні рішення для автоматичного збирання, аналізу та передавання даних про стан обладнання. Це сприяє підвищенню ефективності управління енергетичними об'єктами й зниженню експлуатаційних витрат.

Впровадження технологій штучного зору в енергетиці пов'язане й із певними викликами. Серед них – потреба в обробленні великої кількості даних, забезпечення високої точності моделей, стандартизація процедур інспектування та інтеграція з наявними інфраструктурами. Для подолання цих викликів потрібно розробляти адаптивні моделі, здатні до самонавчання в умовах змінного середовища, а також створювати відкриті набори даних для покращення точності прогнозів.

Отже, використання технологій штучного зору для контролю стану енергетичного обладнання в автоматичному режимі відкриває нові можливості для підвищення надійності, ефективності та безпеки енергопостачання. Завдяки безконтактному моніторингу, режиму реального часу, прогнозуванню несправностей та інтеграції з іншими системами штучний зір стає перспективною частиною сучасної енергетичної інфраструктури.

1. Afridi Y. S., Ahmad K., & Hassan L. Artificial intelligence based prognostic maintenance of renewable energy systems: A review of techniques, challenges, and future research directions. *International Journal of Energy Research*. 2022. № *46*(15). P. 21619–21642. https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/er.7100.
2. Ageed Z. S., Zeebaree S. R., Sadeeq M. A., Abdulrazza, M. B., Salim B. W., Salih A. A., ... & Ahme, A. M. A state of art survey for intelligent energy monitoring systems. *Asian journal of research in computer science*. 2021. № *8*(1). P. 46–61. https://www.academia.edu/download/96640245/56660.pdf.
3. Baduge S. K., Thilakarathna S., Perera J. S., Arashpour M., Sharafi P., Teodosio B., ... & Mendis P. Artificial intelligence and smart vision for building and construction 4.0: Machine and deep learning methods and applications. *Automation in Construction*. 2022. № 141. https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0926580522003132.
4. Fan X. A., Gao X., Liu G., Ma N., & Zhang Y. Research and prospect of welding monitoring technology based on machine vision. *The International Journal of*

Advanced Manufacturing Technology. 2021. № 115. P. 3365–3391. https://link.springer.com/article/10.1007/S00170-021-07398-4.
5. Gültekin Ö., Cinar E., Özkan K., & Yazıcı A. Real-time fault detection and condition monitoring for industrial autonomous transfer vehicles utilizing edge artificial intelligence. *Sensors*. 2022. № *22*(9). https://www.mdpi.com/1424-8220/22/9/3208.
6. Høiaas I., Grujic K., Imenes A. G., Burud I., Olsen E., & Belbachir N. Inspection and condition monitoring of large-scale photovoltaic power plants: A review of imaging technologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2022. № 161.
7. Krymska A., Ponomarenko O. Information Technologies for Improving the Efficiency of Ukraine's Energy Systems. *System Research in Energy Sector*. 2024. №2(a). Pp. 26–27. URL: http://jnas.nbuv.gov.ua/article/UJRN-0001494154.
8. Liang H., Li Z., Liu C., Yang J., & Zhang Y. Computer vision based automatic power equipment condition monitoring and maintenance: a brief review. *International Symposium on Distributed Computing and Applications for Business Engineering and Science*. 2020. P. 142–145. https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/9277813/.
9. Luo H., Wang M., Wong P. K. Y., & Cheng J. C. Full body pose estimation of construction equipment using computer vision and deep learning techniques. *Automation in construction*. 2020. № 110. https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S092658051930634X.
10. Ranyal E., Sadhu A., & Jain K. Road condition monitoring using smart sensing and artificial intelligence: A review. *Sensors*. 2022. № *22*(8). https://www.mdpi.com/1424-8220/22/8/3044.
11. Vo T. T. E., Ko H., Huh J. H., & Kim Y. Overview of smart aquaculture system: Focusing on applications of machine learning and computer vision. *Electronics*. 2021. № *10*(22). https://www.mdpi.com/2079-9292/10/22/2882.

І.І. Яремак

ENERGY SECURITY OF UKRAINE IN THE CONTEXT OF DIGITAL TRANSFORMATION AND WARTIME THREATS

Ukraine's energy infrastructure remains under constant threat from Russian attacks. The country's power system is still highly vulnerable, as a growing number of missiles and drones strike key facilities. Meanwhile, the ongoing evolution of offensive tactics and technologies continues to pose a serious challenge for Ukraine's air and passive defence systems.

Energy security lies at the heart of Ukraine's national stability. Guaranteeing uninterrupted access to electricity for Ukrainian citizens is a top priority. Although Ukraine has made significant progress in restoring and enhancing the resilience of its energy system during the past spring and summer, the situation remains delicate. The threat of major disruptions and large-scale instability persists - especially if Russia escalates its attacks.

Prior to 2022, the country's dispatchable power generation capacity stood at about 38 gigawatts (GW) [1]. However, as a result of significant losses and damages to the energy infrastructure, by October 2025 Ukraine's Ministry of Energy expected that only 17.6 GW of total generation capacity would be available in preparation for the upcoming heating season [2]. The situation remains dynamic as Russian strikes on the power infrastructure persist, which makes it crucial to advance the digital transformation of the energy sector, especially during wartime, as it enables faster decision-making, improved resilience, and more efficient management of energy resources.

Ukraine has undertaken significant efforts to rebuild its damaged power infrastructure, while also expanding distributed generation and battery storage systems. It is worth noting that in the context of synchronization with the European energy system, the development of decentralized generation, and the implementation of energy storage systems, it is particularly important to carry out the digital transformation of the energy sector. Therefore, the reconstruction of Ukraine's energy system should be carried out with the extensive integration of modern digital technologies.

Looking to the future, Ukraine aims to build a modern, low-carbon power system fully integrated into the European energy markets - a goal reflected in strategic documents such as the Energy Strategy 2050 and the National Energy and Climate Plan (NECP) 2030. The main challenge lies in ensuring that current decisions on power sector reconstruction, market structure, and new generation development not only strengthen the immediate security of energy supply, but also contribute to long-term systemic transformation.

The issue of digital transformation of Ukraine's power sector has become particularly significant under the conditions of deliberate destruction of the

country's energy infrastructure, as its implementation will make it possible to promptly obtain information about damages and ensure the fastest possible restoration of electricity supply to consumers.

As is well known, digital transformation in production is based on automation, real-time data exchange, integration of cyber-physical systems, cloud technologies, and artificial intelligence, which are the core elements of Industry 4.0 [3]. In the context of the energy sector, digital transformation enables the shift towards flexible, self-regulating, energy-efficient, and highly reliable next-generation energy systems [4]. These systems rely on the Internet of Things (IoT) for smart meters and sensors, Big Data and data analytics for forecasting consumption and generation, artificial intelligence (AI) for optimizing operational regimes, blockchain for transparent settlements among market participants, smart grids for coordinated interaction of all system elements, and energy storage systems for balancing demand and supply.

An analysis of the digital transformation of Ukraine's power system subsystems reveals the following applications and benefits:

for the generation system:

- IoT implementation under the conditions of a decentralized energy system, enabling precise and remote monitoring of demand and energy production, integration of diverse energy sources (hydro, coal, gas, solar, wind, geothermal, marine, and nuclear), improved production efficiency, and enhanced system stability and reliability;
- energy storage and analytics, assessing the feasibility of implementing storage systems to minimize imbalances between demand and supply and increase flexibility;
- digitalized power generation, where system operators and utility companies can control numerous generation units, improving asset utilization, management, and minimizing the risk of blackouts in the context of missile attacks on Ukraine's energy infrastructure;
- integrated management of electric vehicle (EV) fleets, including monitoring charging station data, analyzing charging and discharging states, assessing the impact of EVs on load, and determining optimal locations for new charging stations.

For the transmission and distribution systems:

- smart grids (Grid Management): creation and provision of intelligence to the grid using ICT and Big Data, enhancing energy efficiency and security of supply while reducing the need for backup capacity;
- network management, using Big Data at key points for optimal grid control and identifying weak points to prevent blackouts, which is particularly important in Ukraine given the deliberate destruction of substations and transmission lines;
- microgrids, providing autonomous network management independent of the central grid while establishing interoperability between the microgrid and the main energy system.

For end-users:

- demand response in commercial, industrial, and residential sectors, enabling load reduction, shifting, or leveling to minimize peak consumption and reduce grid congestion;

- Advanced Metering Infrastructure (AMI), installing sensors and devices at consumer sites to obtain load and temperature data, allowing evaluation of load variations over time and identification of areas for improving energy efficiency.

- battery Energy Management, where end-users perform data analytics to trigger batteries at optimal times, enhancing energy efficiency through optimal charging and discharging strategies;

- home automation, enabling remote monitoring and control of appliances, saving time and energy, increasing awareness of energy consumption, and improving integration of distributed generation and energy storage systems.

A crucial element of digital transformation across all three subsystems - generation, transmission, and consumption - is the use of digital twins. Their application allows real-time modeling, monitoring, and optimization of processes, improving system efficiency, reliability, and resilience. Digital twins also enable fast fault detection and resolution, support load forecasting and planning, and facilitate the integration of renewable energy sources.

Another key component is the application of AI and blockchain in the energy system. AI is primarily used for demand-side management, next-day generation forecasting, and smart grid stability analysis. Blockchain, as a distributed ledger technology, enables smart contracts with hash cryptography, ensuring transparent, secure, and immutable energy trading, particularly for households and industrial consumers.

Thus, digital transformation in the energy sector has become especially relevant under wartime conditions to ensure Ukraine's energy security and is aimed at sustainable and reliable management of energy resources. The study highlights that the development of digital technologies, particularly IoT, allows the traditional energy grid to evolve into a smart grid, enhancing efficiency, monitoring, and overall resilience.

The existing challenges of Ukraine's energy sector under the conditions of systematic destruction of energy facilities have been analyzed, highlighting the necessity of IoT integration, as IoT is a key Industry 4.0 technology for connecting physical assets to the digital network.

Based on this analysis, recommendations were formulated for the implementation of specific technologies to enhance the efficiency and sustainability of Ukraine's energy system. While implementing all these technologies is a complex task, the study suggests integrating digital twins and applying AI for smart grid modeling and the development of virtual power plants. Thus, the study demonstrates that the integration of IoT, blockchain, and AI across all energy subsystems from an architectural perspective enables real-time monitoring, intelligent control, and predictive analytics, significantly improving system efficiency, reliability, and resilience.

1. Yaremak, I. (2025). EU–Ukraine Cross-Border Energy Cooperation: Trends and Directions for Post-War Reconstruction. Borders in Globalization Review, 6(2). https://doi.org/10.18357/big_r62202522129.
2. Interfax-Ukraine. (2025). Ukraine must prepare almost 18 GW of available capacity for heating season. https://en.interfax.com.ua/news/economic/1103990.html.
3. Berawi, M. A. (2019). The Role of Industry 4.0 in Achieving Sustainable Development Goals. International Journal of Technology, 10(4), 644. https://doi.org/10.14716/ijtech.v10i4.3341.
4. Singh, R., Akram, S. V., Gehlot, A., Buddhi, D., Priyadarshi, N., & Twala, B. (2022). Energy System 4.0: Digitalization of the Energy Sector with Inclination towards Sustainability. Sensors, 22(17), 6619. https://doi.org/10.3390/s22176619.

С.Ф. Гончар

РИЗИКИ ЦИФРОВІЗАЦІЇ КРИТИЧНОЇ ЕНЕРГЕТИЧНОЇ ІНФРАСТРУКТУРИ В ЄС

Критична енергетична інфраструктура (енергетичні мережі, електростанції) є життєво важливою для функціонування суспільства та економіки.

Цифровізація критичної енергетичної інфраструктури в ЄС створює нові загрози у вигляді кібератак. Кібератаки використовуються для крадіжки даних, шпигунства за користувачами, відключення або маніпулювання комп'ютерами тощо [1, 2].

Крім того, зростаюча цифровізація традиційних енергетичних технологій робить систему розумнішою та дозволяє споживачам користуватися інноваційними послугами, але одночасно створює значні ризики [3]:

- збільшення уразливості: зростаючий вплив кібератак та кіберінцидентів;
- наслідки: загроза безпеці енергопостачання та конфіденційності даних споживачів.

Хоча в ЄС існує загальна правова база кібербезпеки, енергетичний сектор має унікальні аспекти, що потребують особливої уваги [3]:

- вимоги в режимі реального часу (Real-time requirements): деякі енергетичні системи потребують надзвичайно швидкої реакції, через що стандартні заходи безпеки (наприклад аутентифікація чи перевірка цифрового підпису) можуть бути неприйнятними через спричинену ними затримку;
- каскадні ефекти (Cascading effects): електромережі та газопроводи тісно взаємопов'язані по всьому ЄС, і збій в одній країні може спричинити відключення або дефіцит пропозиції в інших;
- комбінація застарілих та нових технологій (Combined legacy systems with new technologies): багато елементів енергосистеми були створені до появи міркувань кібербезпеки. Вони тепер повинні взаємодіяти з сучасним обладнанням (розумні лічильники, пристрої IoT) без компрометації безпеки.

1. Cybersecurity [Електронний ресурс] // European Commission. – Режим доступу до ресурсу: https://digital-strategy.ec.europa.eu/en/policies/cybersecurity.
2. Гончар С.Ф. Метод оцінювання ризиків кібербезпеки інформаційних систем SMART GRID / Гончар С.Ф. // Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки. – 2020. – Т.31(70). Ч.1. – №3. – С. 97-101.
3. Critical infrastructure and cybersecurity [Електронний ресурс] // European Commission. – Режим доступу до ресурсу: https://energy.ec.europa.eu/topics/energy-security/critical-infrastructure-and-cybersecurity_en.

О.О. Бакалинський, І.О. Бердиченко, Р.В. Проскуровський

ОРГАНІЗАЦІЙНО-ПРАВОВІ ТА ТЕХНІЧНІ МЕХАНІЗМИ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ СТІЙКОСТІ КРИТИЧНОЇ ІНФРАСТРУКТУРИ УКРАЇНИ ЧЕРЕЗ РЕГУЛЮВАННЯ ОБІГУ ІНФОРМАЦІЇ ЩОДО ОБЄКТІВ КРИТИЧНОЇ ІНФРАСТРУКТУРИ

Анотація.

Розглянуто організаційно-правові проблеми обігу інформації у сфері захисту критичної інфраструктури України [1-4]. На основі аналізу чинного законодавства, міжнародних актів і практики держав-членів ЄС, Великої Британії та США [5-10] визначено ключові прогалини у організаційно-правовому регулюванні доступу, класифікації, зберігання та обміну відомостями про об'єкти критичної інфраструктури (далі - ОКІ) [11]. Обґрунтовано необхідність створення єдиного нормативного підходу до класифікації інформації про ОКІ, а також впровадження механізмів захисту службової інформації під час взаємодії державних і приватних операторів.

Метою дослідження є завдання комплексно проаналізувати організаційні аспекти та виявити недоліки чинної нормативно-правової бази України у сфері обігу інформації про об'єкти критичної інфраструктури, визначити основні проблеми її практичного застосування, а також розробити пропозиції щодо вдосконалення відповідного правового та організаційного забезпечення з урахуванням міжнародних стандартів, кращих практик і вимог національної безпеки.

При досліджені застосовано порівняльно-правовий, системно-аналітичний та нормативно-технічний методи аналізу законодавства України, ЄС, Великої Британії та США у сфері захисту критичної інфраструктури. Використано підхід класифікації за рівнями доступу до інформації на основі принципу need-to-know та методики TLP-protocol (Traffic Light Protocol) [12-17].

Основними результатами дослідження можна вважати:

– Виявлено, що законодавче поле України є фрагментарним: відсутні уніфіковані критерії розмежування інформації з обмеженим доступом.

– Визначено, що інформація про ОКІ I–II категорій може становити державну таємницю, тоді як відомості про ОКІ III–IV категорій мають статус службової або конфіденційної інформації, і тільки в окремих випадках становити державну таємницю.

– Обґрунтовано потребу розроблення типового переліку відомостей про ОКІ, що підлягають обмеженню у доступі, та відповідного «Порядку класифікації інформації за режимами доступу».

– Запропоновано створення повноцінного, на відміну від того, що існує, механізму обміну службовою інформацією між державними і приватними операторами на основі письмових зобов'язань (NDA).

– Виявлено ризики витоку інформації через систему Prozorro, зокрема під час закупівель для ОКІ [19].

– Рекомендовано запровадити низку організаційних заходів, спрямованих на забезпечення проведення закупівель без розкриття надлишкової інформації про статус об'єкта як об'єкта критичної інфраструктури, а також розробити уніфіковані шаблони угод про нерозголошення для приватних операторів.

Таким чином вперше системно узагальнено проблематику обігу інформації про критичну інфраструктуру в Україні з позиції комплексного поєднання організаційно-правових і технічних аспектів. Запропоновано модель узгодження режимів доступу, що базується на інтеграції правових норм із технічними стандартами інформаційної/кібербезпеки.

Запропоновані організаційно-технічні заходи можуть бути використані під час підготовки підзаконних нормативно-правових актів до Закону України «Про критичну інфраструктуру», а також при розробленні методичних рекомендацій для секторальних органів та операторів критичної інфраструктури. Крім того, зазначені напрацювання доцільно врахувати у процесі створення національної системи класифікації та захисту службової інформації, що сприятиме формуванню єдиних підходів до управління інформаційною безпекою та підвищенню рівня стійкості критичних об'єктів.

Висновки.

1. Організаційно-правові механізми є невід'ємною складовою стійкості критичної інфраструктури. Їх гармонізація з міжнародними стандартами управління інформаційною безпекою (зокрема ISO/IEC 27001, NIST, Протоколом TLP 2.0) є передумовою формування єдиної системи захисту даних про об'єкти критичної інфраструктури в умовах воєнних загроз.

2. Гармонізація законодавства України у сфері обігу інформації про критичну інфраструктуру потребує розроблення уніфікованих критеріїв класифікації інформації, стандартів обміну даними та режимів доступу. Це створить технічно й організаційно сумісне середовище взаємодії між секторальними органами, державними структурами та приватними операторами.

3. Внесення змін до Постанови КМУ № 736 має закріпити обов'язковість укладання угод про нерозголошення (NDA) між державними органами та приватними операторами. Це забезпечить нормативну основу для контролю обігу службової інформації та зменшить ризики її компрометації.

4. Запровадження стандартизованого механізму інформаційного обміну між державними структурами та операторами критичної інфраструктури на основі спеціальних угод NDA підвищить керованість процесів обміну інформацією, дозволить формалізувати процедури

верифікації та автентифікації даних, а також сприятиме підвищенню рівня довіри між учасниками системи.

5. Удосконалення Закону України «Про публічні закупівлі» шляхом запровадження спеціальних процедур для об'єктів критичної інфраструктури забезпечить зменшення обсягу розголошення технічних характеристик, схем та логістичних даних, що безпосередньо впливають на експлуатаційну безпеку систем у воєнний час.

6. Формування державного класифікатора рівнів чутливості інформації за принципом, аналогічним Протоколу *TLP* 2.0 є необхідним етапом створення системи управління режимами доступу до інформації. Це дозволить адаптувати міжнародні моделі до українського контексту та забезпечить системний підхід до захисту службових даних у державному та приватному секторах.

7. Реалізація вищезазначених заходів має розглядатися не лише як правова ініціатива, а як організаційно-технічна складова національної системи стійкості критичної інфраструктури, що забезпечує безперервність функціонування критичних процесів, мінімізацію ризиків (в тому числі і кібер) КІ держави в умовах війни.

Ключові слова: критична інфраструктура; правове регулювання; службова інформація; конфіденційна інформація; державна таємниця; інформаційна безпека; публічні закупівлі; NDA.

1. Закон України "Про критичну інфраструктуру", від 16 листопада 2021 року, режим доступу - https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1882-20#Text.
2. Закон України "Про інформацію" від 2 жовтня 1992 року, режим доступу - https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2657-12#Text.
3. Закон України "Про державну таємницю" від 21 січня 1994 року, режим доступу - https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/3855-12#Text.
4. Закон України "Про публічні закупівлі" від 25 грудня 2015 року, режим доступу - https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/922-19#Text.
5. Mattila, Päivi, and Isto Mattila. "What If the EU Did Not Share Data to Protect Its Critical Infrastructure?." DGAP Memo 4 (2022). German Council on Foreign Relations. September 2022. https://doi.org/10.60823/DGAP-22-37681-en., DGAP Memo No. 4, September 14, 2022, 2 pp.
6. Report from Digital and Cyberspace Policy Program, SharingClassified Cyber Threat Information With the Private Sector, by Robert K. Knake, May 2018, Council on Foreign Relations, режим доступу - https://www.cfr.org/report/sharing-classified-cyber-threat-information-private-sector?utm_source=chatgpt.com.
7. CRITICAL INFRASTRUCTURE PROTECTION Key Private and Public Cyber Expectations Need to Be Consistently Addressed, United States Government Accountability Office, July 2010, Report to Congressional Requesters, режим доступу - https://www.gao.gov/assets/gao-10-628.pdf.
8. COUNCIL RECOMMENDATION of 25 June 2024 on a blueprint to coordinate a response at Union level to disruptions of critical infrastructure with significant cross-border relevance (Text with EEA relevance), Official Journal of the European Union, режим доступу - EUR-Lex - 32024H04371 - RU - EUR-Lex.

9. MDPI and ACS Style, Ali, H.; Ahmad, J.; Jaroucheh, Z.; Papadopoulos, P.; Pitropakis, N.; Lo, O.; Abramson, W.; Buchanan, W.J. Trusted Threat Intelligence Sharing in Practice and Performance Benchmarking through the Hyperledger Fabric Platform. Entropy 2022, 24, 1379. Режим доступу - https://doi.org/10.3390/e24101379.
10. Guidance Cyber-threat intelligence information sharing guide, Published 8 March 2021, режим доступу - https://www.gov.uk/government/publications/cyber-threat-intelligence-information-sharing/cyber-threat-intelligence-information-sharing-guide?utm_source=chatgpt.com.
11. Порядік ведення реєстру об'єктів критичної інфраструктури, включення таких об'єктів до реєстру, доступу та надання інформації з нього, затверджений постановою Кабінету Міністрів України від 28.04.2023 № 415, режим доступу - https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/415-2023-%D0%BF#Text.
12. Звод відомостей, що становлять державну таємницю, затвердженого наказом Центрального управління Служби безпеки України від 23.12.2020 № 383, зареєстрованого в Міністерстві юстиції України 14.01.2021 за № 52/35674.
13. Наказ Адміністрації Держспецзв'язку від 28.07.2023 № 219/ДСК "Про затвердження Проектних загроз критичній інфраструктурі національного рівня" (зі змінами) цій інформації надано статус "для службового користування".
14. Типової інструкції про порядок ведення обліку, зберігання, використання і знищення документів та інших матеріальних носіїв інформації, що містять службову інформацію, затвердженою постановою Кабінету Міністрів України від 19.10.2016 № 736.
15. https://zakupivli.pro/gov/tenders/ua-2024-06-11-012422-a.
16. https://prozorro.gov.ua/uk/tender/UA-2023-10-03-013088-a.
17. Загальні правила обміну інформацією про кіберінциденти (Протокол TLP) Наказ Адміністрації Держспецзв'язку від 03.07.2023 режим доступу - https://zakon.rada.gov.ua/rada/show/v0570519-23#top.
18. Конституція України від 28 червня 1996 року, режим доступу - https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/254%D0%BA/96-%D0%B2%D1%80#Text.
19. Постанова КМУ № 1178 від 12 жовтня 2022 р Про затвердження особливостей здійснення публічних закупівель товарів, робіт і послуг для замовників, передбачених Законом України "Про публічні закупівлі", на період дії правового режиму воєнного стану в Україні та протягом 90 днів з дня його припинення або скасування, режим доступу - https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1178-2022-%D0%BF#Text.

І.П. Каменева

ЕВРИСТИЧНЕ ПЕРЕДБАЧЕННЯ НЕБЕЗПЕЧНИХ ПОДІЙ В УМОВАХ НЕВИЗНАЧЕНОСТІ

Вступ. В останні кілька років спостерігається занадто швидке зростання кількості катастрофічних подій, що мають руйнівні наслідки. Тому проблема передбачення і завчасного інформування населення про небезпечні події та нові загрози набуває особливого значення.

Передбачення та прогнозування майбутніх подій можна визначити як форму наукової діяльності, спрямовану на визначення або оцінку імовірності тих подій або ситуацій, які можуть відбутися в майбутньому. Передбачення може бути зроблено на свідомому або підсвідомому рівні, як за допомогою логічних міркувань, так і з використанням певних підсвідомих відчуттів. До когнітивних моделей передбачення будемо відносити логічні або імовірнісні моделі передбачення майбутніх подій, які на початкових етапах моделювання включають аналіз наявних даних про можливі небезпеки та виявлення знань на основі попереднього досвіду та евристичних методів.

Основні напрямки досліджень.

Як в природничих, так і в технічних науках більшість розробок спрямовано на розвиток методів і засобів прогнозування динаміки складних процесів, що потребують побудови багатовимірних моделей із врахуванням великої кількості окремих показників, а також характеру змін і коливань для різних проміжків часу. Зауважимо, що термін «передбачення», на відміну від більш конкретного поняття прогнозування, краще використовувати для побудови імовірнісних оцінок щодо подій або ситуацій, які можуть виникнути спонтанно та створити значні загрози для суспільства і навколишнього середовища.

З метою прогнозування майбутніх подій та процесів широко використовують різноманітні методи та засоби математичного моделювання складних динамічних систем, побудовані на основі відомих закономірностей та накопиченого досвіду. В першу чергу це роботи, спрямовані на дослідження особливостей складних систем [1 – 3 тощо], методи нелінійної динаміки, різноманітні міждисциплінарні дослідження задач передбачення, в тому числі, засоби оцінювання майбутніх подій за допомогою евристичних методів, експертних знань та експертних систем.

На жаль, в останні роки такі події відбуваються занадто часто. В першу чергу це природні катастрофи, техногенні аварії та масштабні військові конфлікти, які несуть величезні обсяги руйнувань і безліч людських жертв.

Необхідно також врахувати можливості адаптації до зміни клімату, які мають величезний вплив як на природні системи в цілому, так і на окремі галузі людської діяльності. На міжнародному рівні запропоновано загальні рекомендації з адаптації країн Європейського Союзу до кліматичних змін та визначено можливості їх застосування в Україні [4].

Запропоновано численні спроби побудови моделей та можливих сценаріїв подальшого розвитку небезпечних явищ, але майже всі вони базуються головним чином на ретроспективних даних та вже відомих загальних закономірностях. Загалом, проблема моніторингу, моделювання та передбачення небезпечних подій належить до так званих слабко структурованих проблем, тобто при дослідженні подібних задач виникають питання щодо невизначеності даних або невідомих впливах.

Такі задачі можна формалізувати лише частково, на окремих етапах їх дослідження. Тому передбачення будемо розглядати в рамках евристичного підходу як процес застосування ряду окремих методів в певній послідовності, з врахуванням їх можливостей та співвідношень [5, 6],

Логічні та інтуїтивні моделі. Якщо формалізовані методи базуються на проведенні математичного або статистичного) аналізу тенденцій, зокрема, виявленні критичних точок або біфуркацій в поведінці досліджуваної системи, то більшість неформальних моделей зосереджено на визначенні ознак, прикмет або факторів, які найбільше впливають на можливі зміни й збільшують шанси завчасно передбачити небезпечні події.

Окремі автори вважають, що евристичні методи зручно розглядати в рамках інтуїтивного підходу. Так, в роботі [7] евристики досліджуються як важливі інструменти інтуїтивного бачення. Підкреслимо, що термінологічні аспекти щодо визначення евристичних та інтуїтивних методів в різних джерелах поки ще не узгоджено. Але евристичні методи однозначно включають елементи інтуїтивного бачення, і саме це заважає до кінця зрозуміти їх і формально представити на логічному рівні.

Рисунок 1. – Схема сприйняття та аналізу інформації

На рис. 1 умовно зображений процес взаємодії логічного та інтуїтивного сприйняття інформації, який допомагає побачити цілісну картину. Формальні й математичні засоби моделювання відображують логічну діяльність правої півкулі, а інтуїтивний підхід базується на цілісному сприйнятті образів та голографічній інформації, яку відображує права півкуля.

Зрозуміло, що цілісне уявлення (висновок або оцінку події в цілому) можна одержати лише в процесі синтезу логічного аналізу та інтуїтивного бачення. Саме так може передбачити події досвідчений експерт, а також ті індивіди, яких вважають провидцями. На наш погляд, евристичний підхід дає нам певні можливості для синтезу логічної та інтуїтивної складових.

Згідно з ідеями та припущеннями, викладеним в [8, 9], постановка задачі передбачення може досліджуватись з використанням теорії відносності, де передбачення майбутніх подій розглядається як перехід до нової системи координат. В рамках такої гіпотези для відстеження послідовності майбутніх подій можна обрати таку систему спостереження, де відлік часу відбувається за іншими правилами й майбутні події вже настали. Іншими словами, для виявлення подій, які бажано вчасно побачити і попередити, необхідно вийти за межі звичної системи координат й обрати або побудувати таку систему відліку, яка надає більш широкі перспективи для бачення майбутнього. Це може бути як вихід за межі даної системи спостереження, так і перехід на більш високий рівень аналізу («погляд згори»), більш ефективний для відстеження майбутніх змін або виникнення небезпечних тенденцій.

Вибір системи відліку для передбачення.

Отже, формально події або ситуації будемо розглядати як окремі стани досліджуваної *n-вимірної* системи (природної або соціальної), які можна ідентифікувати та оцінити за допомогою певної сукупності інформативних показників. Зокрема, в роботі [6] проведено дослідження щодо вибору або побудови нової системи відліку з урахуванням інформативності наявної сукупності показників, виявлених на основі аналізу таблиць кількісних даних (зокрема, даних моніторингу небезпечних подій).

Серед формальних методів переходу до нової системи відліку найбільш відомі методи факторного аналізу (в тому числі, метод головних компонент) і засоби побудови. багатовимірних шкал. Процес виявлення (або побудови) найбільш цінних параметрів забезпечує стисле (компактне) представлення вихідної множини подій із збереженням найбільш важливих характеристик. Нагадаємо також, що перехід до простору меншої розмірності надає більше можливостей для візуальної інтерпретації певних змін або тенденцій, які можна надати у вигляді фазових портретів.

З іншого боку, в рамках концепції зменшення числа вимірів далеко не завжди вдається зберегти всю цінну інформацію, необхідну для подальших досліджень, тобто передбачення майбутніх подій та прийняття управлінських рішень. Отже, бажано на окремих етапах аналізу використовувати певні неформальні засоби (евристики), які допоможуть ситуативно коректувати одержані прогнози в умовах невизначеності.

В даному разі доцільно нагадати альтернативний підхід до побудови нової системи відліку, спрямований на збільшення числа параметрів. Така альтернатива викликає аналогію з відомою теоремою Геделя про неповноту формальних систем: щоб одержати більше інформації про поведінку певної

системи в майбутньому, потрібно поглянути на цей процес з інших точок зору, обрати більш ефективний рівень для спостереження, який допоможе вийти за межі даної системи. Зокрема, це може бути побудова нової системи відліку за рахунок додаткових вимірів, які допоможуть вести спостереження за системою з різних позицій. Наприклад, можна обрати простір, що має на один вимір більше (тобто $n+1$). Для фізичного простору, звичайно, йдеться про вимір часу (3 + 1).

На основі викладених міркувань можна побудувати комбіновані алгоритми вибору нової системи відліку, що включають два етапи:

1. Побудова системи κ нових координат на основі вихідних даних, тобто стиснення вихідної інформації до базової структури, яка включає κ інформативних ознак.

2. Розширення до простору $\kappa + 1$ (в загальному випадку $\kappa + l$), тобто створення додаткових можливостей для «погляду згори», тобто спостереження подій з інших позицій.

Таким чином, на основі проведених досліджень можна стверджувати, що для передбачення небезпечних подій важливо поєднувати можливості логічних та інтуїтивних засобів аналізу інформації в єдиному семантичному просторі знань, побудованому на основі накопиченого досвіду.

1. Gilmore R. Catastrophe Theory for Scientists and Engineers. John Wiley & Sons Inc., 1981. – 686 с.
2. Nikolis, G., Prigogine, I. Exploring complexity: An introduction. W.H. Freeman and Company, New York, 1989. – 328 с.
3. Системи прогнозування перебігу надзвичайних ситуацій природного та техногенного характеру. Розробки Інституту проблем математичних машин і систем НАН України. https://www.old.nas.gov.ua/EN/Messages/Pages/View.aspx?MessageID=2419.
4. Массей Е. Досвід Європейського Союзу в адаптації до зміни клімату та застосування його в Україні, 2012. https://www.osce.org/files/f/documents/a/9/93311.pdf.
5. Згуровський М.З., Панкратова Н.Д. Основи системного аналізу. – К.: Видавнича група BHV, 2007. – 544 с.
6. Каменева І.П., Артемчук В.О. Проблема інформативності та визначення інформативних структур для підтримки прийняття рішень в галузі екологічної безпеки // Електронне моделювання, 2022, 44, № 3, с. 50-64.
7. Gerd Gigerenzer, Heuristics: The Tools of Intuition (from Part II – Intuition and Its Intelligence, published 2023. https://www.cambridge.org/core/books/abs/intelligence-of-intuition/heuristics-the-tools-of-intuition/8D68CFA2E526EF5FFA296FBA1A6D8B45.
8. Івахненко О.Г., Лапа В.Г. Передбачення випадкових процесів. – К., Наукова думка, 1969. – 420 с.
9. Лапа В.Г. Методы предсказания и предсказывающие системы. – К.: Вища школа, 1980. – 184 с.

А.А. Ублінських

МОЖЛИВОСТІ ІНТЕГРАЦІЇ БЛОКЧЕЙН-ТЕХНОЛОГІЙ В ІНФРАСТРУКТУРУ ДЕЦЕНТРАЛІЗОВАНОЇ ЕНЕРГОСИСТЕМИ

Стрімке поширення децентралізованих енергосистем зумовлене технологічним прогресом і розвитком відновлюваних джерел енергії (зокрема, сонячної генерації), що дає змогу домогосподарствам і малим виробникам локально генерувати електроенергію та реалізовувати надлишки локальним споживачам. Одним з перспективних напрямів еволюції таких ринків є використання блокчейн-технологій для фіксації даних, відстеження надання послуг та розрахунків, зокрема із застосуванням криптовалют [1–4].

Метою даної роботи є розгляд інтеграції блокчейну зі смарт-лічильниками як невід'ємними компонентами розумних електричних мереж (smart grids) [1]. Смарт-лічильник — це цифровий облікований прилад, що встановлюється на заміну аналоговому та забезпечує вимірювання споживання, базовий аналіз якості електроенергії та доступ до даних через мобільні/веб-застосунки. У країнах ЄС смарт-лічильники становлять ядро інтелектуалізації розподільчих мереж і сервісів попиту-пропозиції [1].

Апаратно-програмні платформи смарт-лічильників різняться за обчислювальними ресурсами: від простих MCU/SoC (архітектури 8051, AVR, ARM Cortex-M, RISC-V) до потужніших одноплатних комп'ютерів (ARM Cortex-A, Raspberry Pi), а також вбудованих рішень на ПЛІС (FPGA). Типові діапазони — від одиниць мегагерц до гігагерц за тактовою частотою, від байтів/кілобайтів до гігабайтів оперативної пам'яті залежно від класу пристрою та вимог до функціоналу й захисту [1–2]. Така різноманітність архітектур визначає реалістичні межі «on-device» інтеграції з блокчейном.

З огляду на це, у науковій та прикладній літературі простежуються два базові підходи до поєднання смарт-лічильника з блокчейном:

1. Опосередкована (офчейн-керована) інтеграція. Лічильник виступає джерелом достовірних телеметричних даних (виміряного використання і надходження), тоді як їх верифікація, маркування часу, формування подій і розрахунків здійснюються в блокчейн-мережі через шлюз/сервер або хмарний сервіс. Такий підхід доведено на прикладах p2p-торгівлі електроенергією із застосуванням смарт-контрактів, написаних на мові програмування Solidity і розгорнутих на блокчейн-мережі Ethereum, та рішень типу "книга ордерів" [3–4]. Перевага — низькі вимоги до обчислювальних ресурсів лічильника; обмеження — довіра до шлюзів та вимоги до кіберзахисту.

2. Пряма (ончейн-інтеграція) для сертифікації послуг. Лічильник (або його безпечний модуль/шлюз) має можливість безпосередньо формувати та

підписувати транзакції, що створюють у блокчейні перевірювані сертифікати послуги (напр., відновлювальна електроенергія — Renewable Electricity Certificates), забезпечуючи публічну прозорість і незмінність записів [5]. Перевага — мінімізація посередників, прозорість в наданні послуг і запобігання шахрайству; недолік — необхідність у криптографічно захищених модульних реалізаціях та управлінні ключами на рівні приладу.

Ключове методологічне розрізнення — фізичний та цифровий рівні інтеграції: блокчейн функціонує на цифровому рівні розрахунків/сертифікації та не впливає на фізику передавання електроенергії чи параметри мережі [4–5]. З практичного погляду повноцінні вузли блокчейну рідко розміщують безпосередньо в лічильнику через обмеження енергоспоживання, пам'яті й тривалості життєвого циклу ПЗ; натомість типовим є використання легких клієнтів або довірених шлюзів із захищеною телеметрією, апаратним коренем довіри (HSM/TPM/SE) та підписом виміряних даних.

Висновок. Інтеграція блокчейн-технологій у децентралізовану енергосистему є доцільною у ролі інфраструктури прозорих розрахунків, p2p-торгівлі та публічної сертифікації послуг. Смарт-лічильники зазвичай не виконують функції повноцінних блокчейн-вузлів, однак ефективно взаємодіють із розподіленим реєстром через легкі клієнти чи шлюзи, забезпечуючи криптографічно верифіковану телеметрію та простежуваність подій (облік, виставлення інвойсів, випуск "зелених" сертифікатів тощо) [1, 3–5].

1. Rind, Y. M., Raza, M. H., Zubair, M., Mehmood, M. Q., & Massoud, Y. (2023). Smart Energy Meters for Smart Grids, an Internet of Things Perspective. Energies, 16(4), 1974. https://doi.org/10.3390/en16041974.
2. Rind, Y. M., Raza, M. H., Zubair, M., Mehmood, M. Q., & Massoud, Y. (2023). Smart Energy Meters for Smart Grids, an Internet of Things Perspective. Energies, 16(4), 1974. https://doi.org/10.3390/en16041974.
3. Tahir, M., Ismat, N., Rizvi, H. H., Zaffar, A., Nabeel Mustafa, S. M., & Khan, A. A. (2022). Implementation of a smart energy meter using blockchain and Internet of Things: A step toward energy conservation. Frontiers in Energy Research, 10. https://doi.org/10.3389/fenrg.2022.1029113.
4. Bielecki, S., Skoczkowski, T., Sobczak, L., & Wołowicz, M. (2022). Electricity Usage Settlement System Based on a Cryptocurrency Instrument. Energies, 15(19), 7003. https://doi.org/10.3390/en15197003.
5. Sato, Y., Fazekas, S. Z., & Yamamura, A. (2023). Decentralised Renewable Electricity Certificates Using Smart Meters and Blockchain. У Lecture Notes in Networks and Systems (С. 983—990). Springer Nature Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-99-3243-6_79.

Є.М. Клопот

ФОРМУВАННЯ ТА РЕАЛІЗАЦІЯ КАДРОВОЇ СТРАТЕГІЇ У МІЖНАРОДНИХ СЕРВІСНИХ КОМПАНІЯХ

У сучасному глобалізованому середовищі сервісні компанії дедалі більше залежать не від фізичних активів, а від компетенцій, гнучкості та залученості персоналу. Людський капітал стає ключовим ресурсом стійкого розвитку, а кадрова стратегія – центральним елементом корпоративного управління. Особливу актуальність ця проблема набуває для міжнародних сервісних компаній, діяльність яких охоплює різні культурні, економічні та правові простори.

Кадрова стратегія у міжнародному бізнесі — це система довгострокових управлінських рішень, що спрямовані на забезпечення відповідності між стратегічними цілями організації та потенціалом її працівників. Її сутність полягає у створенні синергії між глобальною корпоративною політикою та локальними моделями праці, що дозволяє зберігати баланс між ефективністю і гнучкістю.

1. Теоретичні основи кадрової стратегії у сервісному секторі.

У класичних підходах кадрову стратегію часто зводили до кадрового планування, підбору, навчання та оцінювання персоналу. Однак для сервісних компаній ці процеси набувають стратегічного характеру. Їх головна мета — не лише заповнити вакансії, а створити систему, де кожен працівник є носієм цінностей бренду та частиною клієнтського досвіду.

Автором запропоновано концепцію “Human Synergy Design” — проєктування кадрової стратегії як системи, у якій взаємодія працівників створює додану вартість, що перевищує суму індивідуальних результатів. Така стратегія базується на трьох принципах:

- емоційна узгодженість – формування корпоративного клімату довіри та відкритої комунікації;
- когнітивна взаємодоповнюваність – поєднання різних знань і навичок у кросфункціональних командах;
- адаптивна мобільність – здатність працівників швидко перемикатися між проектами і культурами без втрати якості сервісу.

2. Алгоритм формування кадрової стратегії у міжнародних сервісних компаніях.

Формування кадрової стратегії доцільно здійснювати за п’ятиетапною моделлю:

1. Аналіз кадрового середовища.

На цьому етапі оцінюється структура персоналу за компетенціями, віком, мотиваційними типами, а також зовнішні фактори — трудове законодавство, ринок праці, культурні особливості країн присутності.

Автором запропоновано показник індекс кадрової адаптивності (ІКА), який розраховується як відношення кількості працівників, здатних працювати у мультикультурних проєктах, до загальної чисельності персоналу. Практичні дослідження показують, що оптимальний рівень ІКА для міжнародних сервісних компаній становить 0,6–0,7.

2. Формування кадрової політики. На цьому етапі визначаються пріоритети: глобальні (уніфікація процесів) і локальні (врахування національних особливостей). Для сервісних компаній важливо поєднати стандартизовані процедури (оцінка, розвиток, компенсація) із локальними механізмами мотивації.

3. Розроблення програм розвитку персоналу. Ключовим інструментом стає створення цифрових платформ навчання (Learning Management Systems), які забезпечують безперервний розвиток компетенцій у реальному часі.

4. Управління корпоративною культурою. Культура міжнародної сервісної компанії формується через постійний діалог між центром і філіями. Дослідження автора показує, що застосування культурного модератора (Cultural Moderator) — посередника між головним офісом і локальними командами — знижує конфліктність у мультикультурних проєктах на 28 %.

5. Оцінка результативності кадрової стратегії. Рекомендується використовувати не лише фінансові метрики (плинність кадрів, витрати на персонал), а й соціально-психологічні: рівень залученості, довіри, ідентифікації з брендом.

3. Реалізація кадрової стратегії: цифровий і поведінковий вимір.

Сучасні кадрові стратегії реалізуються у цифровому просторі. У міжнародних сервісних компаніях активно використовуються AI-based HR Analytics, Big Data Talent Mapping, Predictive Retention Models. Автором у 2024 р. проведено дослідження на базі вибірки 12 міжнародних сервісних компаній (IT, консалтинг, логістика). Результати показали, що впровадження предиктивної аналітики кадрів дозволяє зменшити ризик «неуспішного найму» на 31 %, а час адаптації нових працівників — у середньому на 18 %.

Крім цифрових інструментів, особливу роль відіграє поведінковий аспект. У мультикультурних командах ефективність взаємодії часто залежить не від компетенцій, а від рівня емоційного інтелекту (EQ). Тому сучасна кадрова стратегія передбачає розвиток так званих soft resilience skills — психологічної стійкості, емпатії та здатності до конструктивного спілкування.

Згідно з даними внутрішнього дослідження автора, проведеного у 2024 р. серед працівників сервісних компаній у Польщі, Чехії, Україні та Німеччині (n=210), 74 % респондентів зазначили, що найціннішою рисою лідера є не технічна експертиза, а здатність створювати «психологічну безпеку» у команді. Це підтверджує ефективність підходу резонансного лідерства — моделі, що поєднує стратегічне бачення з емоційною підтримкою персоналу.

4. Виклики та напрями вдосконалення кадрової стратегії.

Основними викликами для міжнародних сервісних компаній у сфері кадрового менеджменту залишаються:

- кадрова фрагментація, що виникає через відмінності у законодавстві, культурі та очікуваннях працівників;
- цифрова асиметрія — різний рівень технологічної готовності філій;
- емоційне вигорання персоналу, особливо в умовах дистанційної роботи;
- етичні дилеми використання AI в HR, пов'язані із захистом персональних даних і прозорістю алгоритмів оцінки.

У відповідь на ці виклики автор пропонує концепцію "Adaptive Integrity Strategy" — кадрової стратегії, побудованої на гнучких етичних стандартах і алгоритмах самокорекції. Такий підхід передбачає регулярне оновлення політик і процедур відповідно до змін середовища та зворотного зв'язку працівників.

Перспективним напрямом розвитку кадрових стратегій є поєднання трьох компонентів:

- Аналітичної прозорості (Data Transparency) — відкритий обмін даними між рівнями управління;
- Соціальної справедливості (Social Fairness) — баланс між продуктивністю та добробутом персоналу;
- Екології праці (Work Ecology) — формування умов, що підтримують емоційне та фізичне здоров'я працівників.

5. Висновки.

Кадрова стратегія міжнародних сервісних компаній сьогодні стає не просто управлінською функцією, а механізмом формування організаційної ідентичності. Її ефективність визначається не кількістю процедур, а рівнем внутрішньої синергії, довіри та гнучкості команди.

У результаті дослідження сформовано авторське бачення кадрової стратегії як динамічної системи управління знаннями, культурою та поведінковою взаємодією, яка постійно адаптується до змін у глобальному середовищі. Практичне значення цієї моделі полягає у можливості створення самонавчальних організацій, де кадрові процеси не лише підтримують бізнес, а й визначають його стратегічний розвиток.

1. ДСТУ 3008-2015. Інформація та документація. Звіти у сфері науки і техніки. – Київ: Мінекономрозвитку України, 2015.
2. Grafiati. (2024). Приклади оформлення посилань за APA (7th ed.). URL: https://www.grafiati.com/uk/info/apa-7/examples/.
3. Khlopot, Ye. M. (2024). Human Synergy Design: Adaptive HR Strategies for Global Service Ecosystems. Авторська концепція.
4. Deloitte Insights. (2023). Global Human Capital Trends: The Social Enterprise in a World Disrupted.
5. IBM Institute for Business Value. (2024). AI and Talent Transformation in Service Industries.

О.А. Хоменко, М.М. Худинцев

ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ СТРАХУВАННЯ ТА КІБЕРСТРАХУВАННЯ

Основними напрямами теорії та практики кіберстрахування є врахування специфічних ризиків настання страхових подій у кіберпросторі та впровадження цифрових технологічних та технічних рішень для автоматизації прийняття рішень в процесі страхування. Найбільш актуальними проблемами кіберстрахування на сучасному етапі розвитку страхового ринку та засобів автоматизації кіберстрахування є [1,2]:

- покриття ризиків, пов'язаних зі штучним інтелектом;
- необхідність проактивної підготовки до порушення безпеки інформаційних систем та ресурсів;
- зростання потреб у страхування від аварійних перерв в їх функціонуванні;
- підвищення вимог до управління ідентифікацією та доступом для кіберпокриття.

Таблиця 1. – Статистика ринків страхування та кіберстрахування

Ринок страхування та кіберстрахування	Обсяг у 2024 р. (млрд дол.США)	Доля у загальному ринку, %	Посилання
Глобальний ринок страхування	7799	100	atlas-mag.net
Ринок страхування (Україна)	≈ 1,2	0,015	beinsure.com
Глобальний ринок кіберстрахування	15,3	0,20	munichre.com
Ринок кіберстрахування (Україна)	н/д	≈ 0	forinsurer.com
	0,024 (оцінка)	0,20	

Застосування інформаційних технологій у страхуванні та кіберстрахуванні переживає потужну трансформацію [3].

Сучасні інформаційні технології, що застосовуються у страхуванні та кіберстрахуванні:

- Технології електронного бізнесу (E-Business Technologies);
- Контент-аналіз (Content Analysis);
- Мобільні системи підтримки (Mobile Support Systems);
- Інтеграція інформаційних ресурсів (Information Resource Integration);
- Аналітика великих даних (Big Data Analytics), штучний інтелект (Artificial Intelligence), машинне навчання (Machine Learning), обробка природної мови (Natural Language Processing);
- Блокчейн, смарт-контракти (Blockchain, Smart Contracts);
- Математичне, імітаційне і статистичне моделювання (Mathematical, Simulation and Statistical Modeling).

Модель впровадження інформаційних технологій у кіберстрахуванні полягає у визначенні 3 основних компонентів (доменів), 5 рівнів IT-зрілості кіберстрахування та проведенні відповідного оцінювання.

Основні компоненти (домени) моделі:

- Інформаційні технологічні та технічні рішення страхування;
- Оцінка страхових кіберризиків;
- Інформаційні технологічні та технічні рішення кіберстрахування.

Основні рівні IT-зрілості:

- початковий (хаотичний);
- повторюваний;
- встановлений;
- керований;
- оптимізований.

В якості інтегральної характеристики оцінки рівня кіберстрахування (зрілості кіберстрахування, проникнення інформаційних технологій) пропонується розглядати індекс кіберстрахування (зрілості кіберстрахування), запропонований в рамках моделі. Методологічною основою для впровадження індексу є [4].

1. CyberSight 360: Cyber insurance trends shaping 2025 and beyond (March 2025). *Lander & Rogers*. URL: https://www.landers.com.au/legal-insights-news/cyber-insurance-trends-shaping-2025-and-beyond.
2. Brenda Buckman. The 2025 Cyber Insurance Trends Report (04.02.2025). *Huntress*. URL: https://www.huntress.com/blog/cyber-insurance-trends.
3. Ю. Волошинський, Топ 6 головних технологічних трендів у страховій галузі на 2024 рік. N-iX. URL: https://our-thinking.nashtechglobal.com/insights/new-technology-in-the-insurance-industry.
4. Худинцев М.М., Жилін А.В., Давидюк А.В. Світові індекси кібербезпеки: огляд та методики формування (Глобальний звіт / Каталог). К. : Міжнародний університет кібербезпеки, Інститут проблем моделювання в енергетиці ім. Г.Є. Пухова НАН України, 2021. 240 с.

Ю.В. Бова

ЗАСТОСУВАННЯ ОНТОЛОГІЧНОГО ПІДХОДУ ДЛЯ МОДЕЛЮВАННЯ ЗНАНЬ У ПРОЦЕСІ ДОКУМЕНТУВАННЯ СИСТЕМ БЕЗПЕКИ ІНФОРМАЦІЇ

В умовах стрімкої цифрової трансформації та постійного посилення загроз у кіберпросторі, забезпечення безпеки інформаційно-комунікаційних систем (ІКС) є критично важливим завданням. Ключовим етапом легалізації функціонування ІКС є її авторизація, зокрема в регуляторних органах, як-от Держспецзв'язку. Цей процес вимагає розробки комплексного пакета документації, що описує систему безпеки інформації (СБІ).

Традиційний підхід до створення такої документації є надзвичайно трудомістким, тривалим та вимагає залучення висококваліфікованих фахівців. Ручний збір, аналіз, систематизація та верифікація даних призводять до значних часових витрат та високого ризику виникнення помилок і невідповідностей. Актуальність теми зумовлена потребою в автоматизованих методах, що мінімізують помилки, забезпечують узгодженість даних та верифікацію на основі семантичних технологій. Онтологічний підхід – формалізація знань через створення моделей предметної області (класи, властивості, відношення) дозволяє перейти від неструктурованих текстових описів до семантично узгодженої моделі, що сприяє автоматизації створення документації, полегшенню верифікації даних та забезпеченню узгодженості між різними документами, що відповідає глобальним тенденціям цифрової трансформації в кібербезпеці. Наприклад, онтології вже застосовуються для моделювання знань у сфері безпеки ПЗ [1], у галузі аналізу метаданих великих даних у кібербезпеці [2].

В сучасних дослідженнях розглянуто ряд підходів до формалізації знань в галузі інформаційної безпеки, зокрема створення онтологій для управління ризиками [3], побудова онтологій зі структурою документації безпеки [4], а також контекстно-чутливе моделювання знань безпеки ПЗ [5]. Попри це, застосування онтологічного підходу саме для процесу документування систем безпеки інформації із акцентом на генерацію, узгодження та структурування нормативно-технічної документації залишається недостатньо опрацьованим. Одним з явних обмежень є відсутність інтеграції з генеративним AI для обробки природної мови.

Метою є розробка та наукове обґрунтування онтологічної моделі знань для автоматизації верифікації, забезпечення узгодженості та цілісності документації СБІ, що дозволить підвищити точність, швидкість та адаптивність процесу авторизації ІКС.

Для реалізації поставленої мети визначено наступні задачі:

1. Проаналізувати структури знань, що використовуються при створенні документації СБІ та існуючі онтологічні моделі в сфері безпеки інформації та виявити їх обмеження;

2. Побудувати онтологічну модель, яка формалізує предметну область СБІ - класи об'єктів, БПБ, заходів захисту, загроз, нормативних актів, документів;

3. Запропонувати механізми логічного виведення для верифікації даних та заповнення шаблонів;

4. Розробка моделі представлення Цільового профілю безпеки (ЦПБ) у вигляді динамічного графа знань, що забезпечує його повноту, несуперечливість та трасованість.

Об'єктом дослідження є процеси створення документації СБІ, предметом – онтологічні моделі для автоматизації верифікації та узгодженості. Наукова новизна полягає в удосконаленні онтологічної моделі знань для документування СБІ шляхом доповнення семантично розміченими вимогами базових профілів безпеки та відповідними заходами захисту, що підвищує точність верифікації. Також удосконалено методи забезпечення узгодженості за рахунок механізму логічного виведення на основі онтології, який співставляє множини вхідних та вихідних документів, автоматично заповнюючи плейсхолдери в шаблонах.

Онтологічна Модель Знань (ОМЗ) виступає як "Єдине Джерело Істини" (SingleSourceofTruth) для системи. Вона представляє знання як формальну структуру $O = (C, P, R, A)$, де C – множина концептів (класів сутностей), P – множина властивостей (атрибутів даних), R – множина відношень між класами, A – множина аксіом та правил логічного виведення.

ОМЗ включає ключові класи, такі як Normative_Document (джерело вимог), Security_Requirement (атомарна вимога), Basic_Security_Profile (БПБ) та System_Object (активи ІКС).

ОМЗ є не статичним сховищем, а активним компонентом системи. Логічні зв'язки (ObjectProperties) між класами, такі як is_Sourced_From (трасування вимоги) та requires_BPB (вибір профілю), дозволяють системі автоматично забезпечувати логічну узгодженість.

Критичною функцією моделі є забезпечення відповідності через механізми валідації та логічного виведення. Система використовує триступеневу валідацію (синтаксичну, семантичну та логічну) для перевірки даних, що надходять від користувача. Логічна валідація реалізована за допомогою SWRL (SemanticWebRuleLanguage). Набір формалізованих правил дозволяє автоматично виявляти логічні суперечності.

Для забезпечення узгодженості запропоновано інноваційний підхід до представлення ЦПБ. На відміну від статичного документа, у розробленій системі ЦПБ реалізується як динамічний Граф Знань (KnowledgeGraph) $G(V, E)$. Вершинами V графа є екземпляри класів ОМЗ (об'єкти захисту, заходи, посилання на НД ТЗІ), а ребрами E — їхні семантичні відношення.

Представлення ЦПБ у вигляді графа знань дозволяє виконувати валідаціюповноти за допомогою SPARQL-запитів та забезпечувати повну простежуваність (Traceability) кожного заходу захисту від конкретного об'єкта ІКС до пункту в нормативному документі.

Висновки.

Узагальнено, що застосування онтологічного підходу у процесі документування систем безпеки інформації дозволяє перейти від ручного формування фрагментованих описів до семантично інтерпретування нормативних вимог НД ТЗІ та даних про ІКС. Це забезпечує надійну основу для логічного виведення та автоматизованої перевірки відповідності за допомогою правил SWRL.

Представлення ЦПБ у вигляді динамічного Графа Знань вирішує проблему традиційних підходів, гарантуючи внутрішню логічну узгодженість, повноту та простежуваність всіх елементів профілю безпеки.

Таким чином, розроблені моделі переводять процес документування СБІ з суб'єктивного, ручного процесу у формалізований, об'єктивний та автоматизований, створюючи теоретичну та методологічну основу для значного підвищення його ефективності, точності та надійності наповнення документів.

1. Wen, S.-F., &Katt, B. (2019). Managing Software Security Knowledgein Context: An Ontology Based Approach. Information, 10(6), 216. https://doi.org/10.3390/info10060216.
2. Gladun, A., Khala, K., &Subach, I. (2020). Ontological approach to bigdata analytics in cybersecurity domain. Collection "InformationTechnologyandSecurity", 8(2), 120–132. https://doi.org/10.20535/2411-1031.2020.8.2.222559.
3. Singhal, A. And Singapogu, S. (2012), Security Ontologies for Modeling Enterprise Level Risk Assessment, ACSAC 2012 Works-in-Progess, Orlando, FL, [online], https://tsapps.nist.gov/publication/get_pdf.cfm?pub_id=918926.
4. Ramanauskaitė, S., Shein, A., Čenys, A., &Rastenis, J. (2022). Security Ontology Structure for Formalization of Security Document Knowledge. Electronics, 11(7), 1103. https://doi.org/10.3390/electronics11071103.
5. Mamdouh Alenezi. (2020) Ontology-based context-sensitives oftware security knowledge management modeling. Int. J. Electrical&Computer Engineering (IJECE). DOI:10.11591/ijece.v10i6.pp6507-6520.

В.В. Чернюк

СЕГМЕНТАЦІЯ КОРИСТУВАЧІВ АНІМЕ ЗА ПОВЕДІНКОВИМИ ПАТЕРНАМИ ТА ЖАНРОВИМИ ПРОФІЛЯМИ І ЇЇ ВПЛИВ НА ТОЧНІСТЬ РЕКОМЕНДАЦІЙ

Опис актуальності теми дослідження та проблеми.

Системи рекомендацій є ключовим інструментом у сучасних цифрових медіа, адже вони допомагають користувачам орієнтуватися в умовах надлишку контенту. У сфері аніме це завдання ускладнюється значною жанровою різноманітністю, культурними відмінностями та неоднорідністю поведінкових патернів аудиторії. Традиційні підходи, що базуються виключно на колаборативній фільтрації чи контентному аналізі, часто демонструють обмежену ефективність, особливо у випадках, коли система не має достатньої інформації про нового користувача або контент, а також при роботі з користувачами, чиї вподобання не відповідають загальним тенденціям [2].

У науковій літературі представлено низку досліджень, спрямованих на підвищення точності рекомендаційних систем у сфері відеоконтенту. Серед них поширеними є методи, що враховують контентні ознаки (жанр, тривалість, рейтинг) або поведінкові закономірності користувача (частота переглядів, історія оцінок). Проте більшість із них зосереджуються на індивідуальному рівні моделювання користувача, ігноруючи можливість виявлення узагальнених груп із подібними патернами поведінки. Дослідження сегментації аудиторії, що активно застосовуються у маркетингу, лише частково інтегровані в сучасні рекомендаційні архітектури, що створює прогалину між описовим аналізом користувачів і реальним підвищенням ефективності рекомендаційних алгоритмів [3].

Крім того, відсутність у більшості моделей інтеграції жанрових профілів користувача із його поведінковими характеристиками обмежує здатність системи виявляти латентні подібності між користувачами. Це знижує здатність алгоритмів адаптуватися до динамічних змін у смаках і перешкоджає персоналізації рекомендацій.

Гіпотеза дослідження полягає в тому, що включення сегментаційної ознаки, побудованої на поведінкових і жанрових характеристиках користувачів, здатне суттєво підвищити точність рекомендацій порівняно зі стандартними методами, які не враховують структуру аудиторії.

Методологічні засади сегментації користувачів.

Для дослідження було використано дані з відкритої платформи MyAnimeList, які охоплюють історії переглядів, рейтинги та жанрові вподобання користувачів. Попередньо дані пройшли етапи очищення та

нормалізації: з вибірки вилучено записи з недостатньою кількістю переглядів, а числові показники приведено до порівнянної шкали. Основними відібраними ознаками стали: кількість переглянутих тайтлів, середній рейтинг, який користувач виставляє, та коефіцієнт жанрового різноманіття, що відображає розподіл переглядів між категоріями [1].

Для сегментації застосовано алгоритм k-means, а оптимальну кількість кластерів визначено за допомогою коефіцієнта силуета та індексу Девіса–Боулдіна. Обидві метрики продемонстрували стабільність при виборі чотирьох кластерів, що дало підстави вважати цю кількість найбільш інформативною для подальшого аналізу [4].

Отримані кластери було інтерпретовано як чотири типи користувачів, подані в табл. 1. Вони демонструють відмінності не лише за обсягом переглядів, а й за характером споживання контенту — від обережного й вибіркового до активного та жанрово розмаїтого [5].

Таблиця 1. – Класифікація стилей взаємодії користувачів з платформою

Сегмент користувачів	**Характеристика переглядів**	**Рівень різноманіття жанрів**	**Типові уподобання**
Критичні поціновувачі	Невелика кількість переглядів, високі вимоги до якості	Середнє	Драматичні та психологічні жанри
Масові глядачі	Велика кількість переглядів, високий темп споживання	Високе	Популярні жанри
Нішеві фанати	Орієнтація на обмежене коло серій	Низьке	Специфічні жанрові ніші
Універсальні користувачі	Збалансовані перегляди та оцінки	Високе	Різні жанри без чітких уподобань

Як видно з табл. 1, така класифікація дозволяє описати різні стилі взаємодії користувачів із платформою. Наприклад, “масові глядачі” демонструють високу активність та відкритість до нових жанрів, тоді як “нішеві фанати” концентруються на обмеженому колі серій, що може призводити до заниженої точності колаборативних рекомендацій, побудованих лише на схожості оцінок [7].

Інтеграція отриманої сегментаційної ознаки в рекомендаційну модель дала змогу адаптувати ваги контентних і поведінкових факторів відповідно

до типу користувача. Експериментальне тестування показало, що врахування сегментів підвищує точність прогнозування вподобань: у порівнянні з базовою моделлю колаборативної фільтрації, розширена модель демонструвала зростання показників Precision@10 на 6,3% та NDCG на 5,8%, причому ці відмінності були статистично значущими ($p < 0.05$) [6].

Отримані результати підтверджують, що сегментація не лише допомагає структурувати аудиторію, а й має безпосередній вплив на підвищення точності персоналізованих рекомендацій, особливо у випадках користувачів із нетиповими профілями споживання контенту.

Висновки та пропозиції.

Дослідження підтвердило гіпотезу про те, що сегментація користувачів аніме за поведінковими патернами та жанровими профілями підвищує точність рекомендацій. Зокрема, включення сегменту як додаткової ознаки у модель забезпечило зростання показників Precision@10 на 6,3% та NDCG на 5,8% порівняно з базовою колаборативною фільтрацією, причому відмінності були статистично значущими ($p < 0.05$). Побудована типологія з чотирьох сегментів відобразила різні стилі взаємодії з контентом, що дало змогу поєднати індивідуальні вподобання користувачів із загальними закономірностями поведінкових груп. Науковий внесок дослідження полягає у практичній інтеграції методів кластеризації в рекомендаційні моделі, що розширює підхід до персоналізації контенту у сфері медіа аналітики.

Перспективними напрямами подальших досліджень є застосування більш гнучких методів сегментації, врахування динаміки змін інтересів та інтеграція додаткових сигналів, зокрема соціальної активності чи взаємодій між користувачами. Це створює підґрунтя для розвитку систем рекомендацій нового покоління, що поєднуватимуть точність, персоналізацію та здатність адаптуватися до змін у поведінці аудиторії.

Науковий внесок роботи полягає у формуванні методології сегментації користувачів аніме та демонстрації її впливу на якість персоналізованих рекомендацій, що робить дослідження актуальним як для теорії інформаційних систем, так і для практики стримінгових платформ.

1. MyAnimeList.net - Anime and Manga Database and Community. MyAnimeList.net. URL: https://myanimelist.net/ (date of access: 18.10.2025).
2. Ortega F., González-Prieto Á. Recommender Systems and Collaborative Filtering. Applied Sciences. 2020;10(20):7050. DOI:10.3390/app10207050.
3. Roy D., Dutta M. A systematic review and research perspective on recommender systems. Journal of Big Data. 2022;9:59. DOI:10.1186/s40537-022-00592-5.

4. Erdem E.E., Orman G.K. On the role of user segmentation in recommender systems' performances. Procedia Computer Science. 2023; (2333-2342). DOI:10.1016/j.procs.2023.10.224.
5. Zhang J., Zhang Q., Ai Z., Li X. Context-Based User Typicality Collaborative Filtering Recommendation. Human-Centric Intelligent Systems. 2021;1:43-53. DOI:10.2991/hcis.k.210524.001.
6. Yıldız E., Güngör Ş., Işık E.E. A Hyper-Personalized Product Recommendation System Focused on Customer Segmentation: An Application in the Fashion Retail Industry. J. Theor. Appl. Electron. Commer. Res. 2023;18(1):571-596. DOI:10.3390/jtaer18010029.

Jain S., Singhal R., Goel A., Kumar V. Anime Based on Content-Based Filtering. Journal of Web Development and Web Designing. 2023;8(1). DOI:10.46610/JoWDWD.2023.v08i01.005.

М.С. Дунаєвський

ОПТИМАЛЬНІ ЦІНИ ДЛЯ ПОКРИТТЯ ПОСТІЙНИХ ВИТРАТ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЙ

Вступ. Оптимальні ціни на електроенергію мають компенсувати постійні витрати електростанцій (генераторів) та не бути надміру обтяжливими для споживачів. Короткострокові конкурентні ціни виконують цю функцію та, додатково, стимулюють належний рівень інвестицій у всі типи технологій генерації та накопичення електроенергії [1]. Зауважимо, що вони все ж не розв'язують довгострокових проблем енергетичних ринків, оскільки регулювання цін сторони попиту заважає ринкам визначати дійсно конкурентні ціни.

Мета та завдання. Мета та завдання цієї роботи – продемонструвати як механізм конкурентного ціноутворення сприяє компенсації фіксованих витрат електростанції.

Виклад основного матеріалу. Конкурентний підхід ціноутворення є корисним для спростування двох хибних уявлень щодо постійних витрат. Перше стверджує, що ціни, рівні граничним витратам (конкурентні ціни), не можуть покрити постійні витрати. Друге стверджує, що хоча вони й можуть це зробити, однак лише тоді, коли на ринку спостерігається значний дефіцит потужностей.

Уявлення, що короткострокові конкурентні ціни (ціни на рівні граничних витрат) не дозволяють виробникам відшкодовувати постійні витрати є хибним. Проте відшкодування відбувається не тому, що ціни дорівнюють граничним витратам у короткостроковому періоді, а тому, що у разі відсутності такого відшкодування інвестори припинили б будівництво нових електростанцій, тоді як попит продовжував би зростати. Це спричинило б дефіцит та зростання цін. Довгострокові конкурентні сили забезпечують такі цінові піки, які є достатніми для покриття постійних витрат. Така динаміка є стійкою і діє навіть за наявності цінової межі. Коли нестача інвестицій викликає дефіцит, навіть нижчі піки цін триватимуть достатньо довго для покриття постійних витрат [2].

Окремі цінові піки можуть бути узагальнені за допомогою кривої тривалості цін. Та частина кривої, що лежить вище змінних витрат пікової станції, називається сукупним ціновим піком (aggregate price spike) і відображає річну величину рент від дефіциту, отриману маневровими електростанціями.

Хибне твердження щодо постійних витрат (fixed-cost fallacy) не слід плутати з правильним твердженням, – за умов надлишкових генерувальних потужностей конкуренція призводить до того, що генератори не можуть покрити свої постійні витрати. Це не є проблемою конкуренції або ринків

електроенергії. Це є проявом «невидимої руки» Адама Сміта, яка сигналізує про відсутність потреби у нових інвестиціях.

Розглянемо як генераторам вдається отримують більше, ніж змінні витрати. Оскільки пропозиція дорівнює попиту, граничні витрати дорівнюють ціні P. Проте перший вироблений МВт·год і кожен наступний до максимальної потужності мають витрати, що становлять менше половини від цього рівня. В результаті середні змінні витрати дорівнюють приблизно половині ціни P. Виручка R точно дорівнює $P \times Q$. Оскільки виручка перевищує сукупні змінні витрати (Total Variable Cost (TVC)), у генератора залишаються кошти для покриття постійних витрат. Це називається короткостроковим прибутком, рентою від дефіциту (scarcity rent) або, більш технічно, інфрамаржинальною рентою (inframarginal rent). Вона становить $R - TVC$. В довгостроковій конкурентній рівновазі генератори відшкодовують постійні витрати, навіть якщо ціна завжди дорівнює фізичним граничним витратам ($P = MC$) для всіх генераторів.

Отже, конкурентні ціни забезпечують покриття постійних витрат, однак це ще не доводить їх оптимальність. Слабший варіант хибного твердження про постійні витрати (weak fixed-cost fallacy) визнає, що довгострокові ринкові сили гарантують їх покриття, але стверджує також, що може виникати серйозний дефіцит генерувальних потужностей за умов конкурентного ціноутворення. Змоделюємо ринок з двома типами генераторів і коливаннями попиту (модель двох технологій). Пікові зростання цін, спричинені короткостроковим балансуванням ринку, стимулюють належний рівень інвестицій для обох технологій, навіть якщо вони стикаються з однаковими ринковими цінами балансування. Цей результат поширюється на будь-яку кількість технологій.

Сторона пропозиції цього ринку моделюється як така, що включає дві доступні технології: електростанції базової генерації (base load) та маневрові (peaker) електростанції. Нехай, фіксовані витрати електростанції базової генерації становлять 12 $/МВт·год, – маневрової електростанції 6 $/МВт·год. Змінні витрати електростанції базової генерації становлять 18 $/МВт·год, – маневрової електростанції 30 $/МВт·год. Зауважте, що постійні витрати виражено в тих самих одиницях, що й змінні витрати. Це необхідно для можливості побудови скринінгових кривих. Наприклад, якщо базове навантаження потужністю 5 МВт використовується протягом 100 годин для виробництва 200 МВт·год електроенергії, то загальні витрати в грошових одиницях становитимуть: $5 \times 100 \times 12 + 200 \times 18 = 9600$ $.

Скринінгові криві, відображають сукупні витрати генерації як функцію коефіцієнта використання встановленої потужності генератора. Такі криві можна застосувати для визначення найдешевшого джерела електроенергії для покриття навантаження певної тривалості, оскільки обслуговування навантаження тривалості D відповідає коефіцієнту використання (capacity factor) $cf = D$. У вищенаведеному прикладі технологія маневрових

електростанцій є дешевшою для всіх навантажень з тривалістю менше ніж 0,5 (4380 год/рік), тоді як базові станції є дешевшими для навантажень з тривалістю понад 0,5.

Припустимо, попит змінюється лінійно, з однаковою ймовірністю перебуваючи на будь-якому рівні від 4000 МВт до 8000 МВт за умови, що він не обмежується високою ціною.

Взаємодію пропозиції та попиту можна відобразити кривою тривалості навантаження. Горизонтальна ділянка у верхній частині цієї кривої виникає у випадку, коли доступна потужність є меншою за 8000 МВт, що і виявляється рівновагою. Коли потужність генерації вичерпана, попит обмежується високими цінами. Це можливо завдяки припущенню, що попит є достатньо еластичним в будь-який момент, як і вимагається конкурентним ринком.

За умов такого ринку традиційне регуляторне рішення полягає у встановленні ціни на рівні середніх витрат, будівництві достатнього обсягу потужностей генерації для покриття повного пікового попиту в 8000 МВт та використанні скринінгових кривих для визначення того, що потрібно мати 6000 МВт базових потужностей та 2000 МВт маневрових. Цей висновок робиться шляхом визначення точки перетину кривих на рівні тривалості 0,5, а потім зчитування з кривої навантаження-тривалість, що навантаження у цій точці становить 6000 МВт.

Регуляторне рішення визначає оптимальний рівень базових потужностей, але завищує рівень пікових потужностей. Регулятори традиційно встановлювали ціну на рівні середніх витрат, що перешкоджало високим цінам знижувати попит у періоди дефіциту електроенергії. Як наслідок піковий попит є вищим за соціально оптимальний. Якби витрати пікового споживання покривалися повністю його користувачами, споживання у періоди піку було б меншим. Оскільки ж використовується ціноутворення на рівні середніх витрат, споживачі платять більше у всі інші періоди та більше загалом, ніж у випадку надання їм релевантного вибору.

Оптимальне розв'язання є тотожним регуляторному, за винятком того, що враховується висока вартість забезпечення пікового навантаження та готовність споживачів сплачувати за цю послугу. В оптимальній системі протягом певного часу навантаження дорівнюватиме потужності генерації. Щоб врахувати резервні експлуатаційні маржі у цьому аналізі необхідно задати криву попиту на оперативні резерви.

Позначимо тривалість плоского піку навантаження як D_{PS}, оскільки у ці моменти виникає пікове зростання ціни, коли ціна перевищує змінні витрати маневрового генератора. Якщо додати ще один мегават пікової потужності, він вироблятиме лише частку D_{PS} електроенергії за рік. Середня вартість цієї пікової енергії, (average cost of peak energy (ACE)), з урахуванням фіксованих витрат потужностей, що використовуються для її виробництва, визначається $AC_E = \left({}^{6}\!\!\diagup\!\!{}_{D_{PS}} + 30 \right)$.

Варто зауважити, що це не середня вартість використання 1 МВт пікової потужності, а середня вартість 1 МВт·год виробленої енергії. Такий підхід необхідний, оскільки цінність електроенергії для споживача визначається в $/МВт·год спожитої енергії. Додавати мегават пікової потужності доцільно лише за умови, що згенерована енергія коштуватиме не дорожче за її споживчу цінність. Нехай, цінність електроенергії для споживачів становить 1000 $/МВт·год, тому умовою оптимальної пікової потужності є: $6/D_{PS} + 30 = 1000$.

Якщо ринкова ціна не є сталою в періоди, коли використовується вся наявна потужність, права частина цього рівняння повинна відповідати середній ринковій ціні у ці моменти.

Розв'язання цього рівняння показує, що $D_{PS} = 6/970 \approx 0,62\%$ року, або 54 години на рік. Якщо маневровий генератор потрібен менше ніж 54 години на рік, інвестиції в його придбання є економічно недоцільними. Оскільки крива навантаження-тривалість є лінійною, тривалість 0,62% відповідає навантаженню, яке лише на 25 МВт нижче потенційного максимуму 8000 МВт. Таким чином, плоский пік дорівнює 7975 МВт. Сукупна потужність генерації повинна дорівнювати цьому піковому навантаженню. Попри готовність споживачів сплачувати до 1000 $/МВт·год, щоб уникнути відключень, зумовлених нестачею потужності, цього не вистачає для покриття (переважно фіксованих) витрат на забезпечення додаткових резервів. Оскільки оптимальний рівень базової потужності вже визначено як 6000 МВт, оптимальна пікова потужність становить 1975 МВт.

Висновки. В підсумку, конкурентні ціни забезпечують покриття постійних витрат і стимулюють формування оптимального поєднання технологій генерації з високим ступенем точності. Проблеми ринків електроенергії виникають не через постійні витрати, а через труднощі досягнення конкурентного ціноутворення за наявності недосконалостей сторони попиту.

Дослідження здійснено в рамках проекту «Розвиток розподіленої енергетики в умовах ринку електричної енергії України з використанням технологій та систем цифровізації», що виконується за напрямом використання бюджетних коштів «підтримка пріоритетних для держави наукових досліджень і науково-технічних (експериментальних) розробок» бюджетної програми КПКВК 6541230 в НАН України.

1. Горбачук В.М., Дунаєвський М.С., Сирку А.А. (2020). Сучасні питання генерування та накопичення енергії в енергосистемі України. Східна Європа: економіка, бізнес та управління. Випуск 1 (24). С. 260–268.
2. Stoft S. (2002) Power System Economics: Designing Markets for Electricity. IEEE press & Willey-Interscience.

О.Г. Клименко

ВИЗНАЧЕННЯ СЦЕНАРІЮ ВИКОРИСТАННЯ МІКРОМЕРЕЖ В КОМЕРЦІЙНІЙ ДІЯЛЬНОСТІ ДЛЯ ФОРМУВАННЯ МОДЕЛІ ОПТИМІЗАЦІЇ РЕЖИМУ РОБОТИ В УМОВАХ РИНКУ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ УКРАЇНИ

Готовність енергосистеми до «блекауту» на рівні держави поліпшується завдяки децентралізації генерації і розподілу електроенергії шляхом впровадження локальних енергетичних ресурсів та засобів управління їх режимами за технологіями «розумних мереж».

За IEC TS 62898 визначення «Microgrid» (мікромережа) – це група приєднаних до мережі навантажень та розподілених енергоресурсів з визначеними електричними границями, що формують місцеву електричну енергосистему на розподільчих рівнях напруги (0,4 кВ, 10 кВ, 35 кВ), що діє як єдиний керований організм та здатна працювати з будь-якою іншою (групою) зв’язано чи в острівному режимі [1].

Автономний або острівний режим - наразі це найважливіша функція. Коли у загальній мережі стається аварія (наприклад, блекаут), мікромережа автоматично від'єднується від неї у "точці загального підключення" (PCC). Після від'єднання вона продовжує живити своїх місцевих споживачів, використовуючи власну генерацію (наприклад, сонячні панелі + генератор) та накопичену енергію (з акумуляторів). Це забезпечує безперебійне живлення для критично важливих об'єктів.

За роботу мікромережі відповідає зовнішня система енергоменеджменту (EMS). У режимі реального часу EMS відстежує генерацію, споживання та наявність живлення від системи розподілу. У складі мікромережі EMS є основним засобом контролю та управління режимами як мікромережі загалом, так і окремих енергетичних ресурсів [2, 12].

Економічно доцільним наразі є впровадження складових мікромереж – установок зберігання електроенергії (УЗЕ – ESS). Кількість саме таких установок на території України безупинно збільшується. Інтерес інвесторів пояснюється їх здатністю створення бізнес-процесів.

Сценарії використання в комерційній діяльності, було визначено грунтуючись в їх потребі та цілях. Стандарт [1] описує шість основних сценаріїв використання мікромереж.

1) Гарантія безперервності у роботі навантаження за відокремлення.

2) Електрифікація віддалених районів за рахунок використання відновлювальних джерел енергії.

3) Оптимізація місцевих ресурсів для забезпечення електропостачання клієнтів всередині мікромережі.

4) Оптимізація місцевих ресурсів забезпечувати відповідальні об’єкти, приєднані до системи електропостачання району електромереж - аварійна готовність.

5) Формування крупнішої енергосистеми завдяки взаємозв'язку ізольованих мікромереж.

6) Зменшення витрат на електроенергію використовуючи місцеві ресурси всередині керованої розподільної системи.

Варто зазначити, що серед сценаріїв використання мікромереж у комерційній діяльності спостерігається можливість впровадження того чи іншого сценарію в залежності від одиничної потужності та загальної кількості мікромереж, оснащеності автоматикою вимкнення/ввімкнення навантаження.

Для України в цей час характерний сценарій розвитку мікромереж №1 «Гарантія безперервності у роботі навантаження за відокремлення». Сценарій найпростіше здійснити на перших етапах розвитку електромереж підприємств. Характерний відсутньою потребою в диспетчеризації з боку оператора системи розподілу (ОСР). Відпуск електроенергії в енергосистему обмежений. Потужність від електроустановки мережа не приймає, а канали зв’язку для управління диспетчером ОСР/ОСП також не встановлені. Тобто, генерація спрямована на забезпечення лише ізольованого навантаження цієї мікромережі. Сценарій становить значний інтерес, однак потребує: - оснащення центральним контролером мікромережі (дороговартісною зовнішньою EMS); - створення/налагодження каналів зв’язку між та контролерами локальних електроприймачів, локальних дизель-генераторів, локальних гібридних інверторів і центральним контролером мікромережі; - комерційного заохочення на законодавчому рівні, оскільки є основою для інших важливих сценаріїв.

Сценарій №2 «Електрифікація віддалених районів за рахунок використання відновлювальних джерел енергії» не вбачається поширеним для материкової України. Наразі електрифікована вся рівнинна територія, а місцевість для цього сценарію зустрічається рідко.

Сценарій №3 «Оптимізація місцевих ресурсів для забезпечення електропостачання клієнтів всередині мікромережі» має на меті зменшення перетоків, зниження вартості енергії - збільшення місцевого споживання енергії, зменшення викидів парникових газів.

Сценарій №4 «Оптимізація місцевих ресурсів забезпечувати відповідальні об’єкти, приєднані до системи електропостачання району електромереж - аварійна готовність» має на меті забезпечення електроенергією кількох споживачів у разі надзвичайної ситуації, або допоміжні послуги для електроенергосистеми, такі як регулювання частоти, контроль напруги в зоні. Тобто, цей сценарій використання припускає, що мікромережі або розподілені енергетичні ресурси - є одним із рішень для покращення якості електроенергії, надійності та доступності електропостачання для клієнтів ЕЕС.

Реалізація сценарію №5 «Формування крупнішої енергосистеми завдяки взаємозв'язку ізольованих мікромереж» не вбачається складним, але стане можливим після появи великої кількості мікромереж (ізольованих), шляхом їх об’єднання, уникаючи крупних систем передачі або розподілу.

Впровадження сценарію №6 «Зменшення витрат на електроенергію використовуючи місцеві ресурси всередині керованої розподільної системи» має на меті: - зменшення капітальних та операційних витрат на технічне обслуговування та експлуатацію мережевої інфраструктури; - сприяти використанню місцевих енергетичних активів і ресурсів з урахуванням технічного, економічного та екологічного впливу різних технологій виробництва та транспортування енергії. Сценарієм досягається мінімізація витрат на транспортування енергії, налаштування торгівлі «за механізмом самовиробництва». При цьому власник УЗЕ може продавати надлишки виробленої та/або збереженої електричної енергії за ринковими цінами [5].

Основною частиною досліджень є розробка моделей оптимізації для сценарію №6. Ці моделі дозволяють визначити оптимальний графік керування компонентами мікромережі, залежно від коливання вартості електроенергії на роздрібному ринку. Імітаційне моделювання з використанням Gurobi Optimizer виконується при розв’язанні завдань розробки та тестування графіків управління режимами мікромережі на основі даних прогнозу споживання та вартості електроенергії з метою раціонального використання наявних локальних енергетичних ресурсів [7].

Мета досліджень полягає у розробці формалізмів для визначення оптимальної (за критерієм мінімізації строку окупності) архітектури мікромережі та планування графіків оптимального використання наявних енергетичних ресурсів. Розроблені за результатами досліджень математичні і імітаційні моделі надаватимуть інструментарій для вибору оптимальних рішень як на етапах проєктування, так і у процесі експлуатації мікромережі. Розроблені формалізми також можуть бути використані при підготовці нормативно-правових актів, а також для імітації режимів як окремої онлайн-послуги для планування діяльності операторів мікромереж.

Дослідження в цьому напрямку має потенціал для значного внеску в енергетичну безпеку України та перехід до чистої енергії майбутнього, завдяки оптимальному керуванню роботою мікромереж на ринку електроенергії, що розвивається.

1. Microgrids – Part 4: Use cases, IEC TS 62898-4.
2. Блінов, І.В., С.О. Палачов, Є.В. Парус, О.Г. Клименко. «Сценарії використання мікромереж згідно з міжнародними стандартами». Праці Інституту електродинаміки Національної академії наук України, вип. 70, Квітень 2025, с. 014, https://doi.org/10.15407/publishing2025.70.014.
3. Code of transmission systems. NERC Resolution 14.03.2018 №309. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/v0309874-18#Text (Accessed at 02.08.2025) (Ukr).

4. Ancillary services market. ULR: https://ua.energy/dopomizhni-poslugy/#1724134294973-419ecfbb-7d12.
5. On Alternative Energy Sources. Law of Ukraine 20.02.2003 № 555-IV ULR: https://zakon.rada.gov.ua/rada/show/555-15#Text (Accessed at 01.04.2025) (Ukr).
6. Concept of implementation of “smart grids” in Ukraine by 2035. Order of the Cabinet of Ministers of Ukraine 14.10.2022 № 908-p. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/908-2022-%D1%80#Text (Accessed at 01.04.2025) (Ukr).
7. Парус Є.В., Блінов І.В. Оптимізація використання доступних енергоресурсів мікромережі за умов підтримки готовності до ізольованого режиму. Технічна електродинаміка. 2025. №5. С. 56-69. DOI: https://doi.org/10.15407/techned2025.05.056.
8. I.V. Blinov, Ye.V. Parus, P.V. Shymaniuk and A.O. Vorushylo. 2024. Optimization model of microgrid functioning with solar power plant and energy storage system. Tekhnichna Elektrodynamika. 2024. No 5. Pp. 69–78. (Ukr) DOI: https://doi.org/10.15407/techned2024.05.069.
9. Kyrylenko O., Denysiuk S., Blinov I. Energy management: new priorities of the 21st century. Power engineering: economics, technique, ecology. 2024. No 1. Pp. 7–27. DOI: https://doi.org/10.20535/1813-5420.1.2024.297508 (Ukr).
10. © Huawei Digital Power Technologies Co., Ltd., ULR: https://eu5.fusionsolar.huawei.com/unisso/login.action.
11. IEC TS 62898-1: 2017/Amd.1:2023 Microgrids – Part 1: Guidelines for microgrid projects planning and specification. Geneva, IEC, 2023. 72 p.
12. Блінов, І.В., С.О. Палачов, Є.В. Парус, О.Г. Клименко. «Структура та функції систем енергоменеджменту мікромережі в умовах підключення до системи розподілу згідно до вимог міжнародних стандартів». Праці Інституту електродинаміки Національної академії наук України, вип. 71, Серпень 2025, с. 15 – 27, DOI: https://doi.org/10.15407/publishing2025.71.015.

С.А. Недосєка, О.А. Владимирський, В.М. Зварич,
О.В. Артемчук, І.А. Владимирський, М.А. Яременко, І.П. Криворучко

ОСОБЛИВОСТІ МЕТОДИКИ АКУСТИКО-ЕМІСІЙНОЇ ДІАГНОСТИКИ ТРУБОПРОВОДІВ КРИТИЧНОЇ ІНФРАСТРУКТУРИ

Наявний досвід авторів показує, що майбутнє діагностики, і, відповідно, забезпечення надійної експлуатації об'єктів критичної інфраструктури нероздільно пов'язано з використанням цифрових технологій, інтегрованих з прецизійним вимірювальним обладнанням.

У рамках проекту 2023.04/0022 «Розроблення апаратно-програмного комплексу та методики оперативного виявлення пошкоджень систем тепло- та водопостачання з врахуванням їх зношеності та мілітарних впливів», запропоновано ряд технічних та методичних вдосконалень найбільш ефективних з існуючих на сьогодні, акустичних методів та приладів діагностування трубопроводів. Ці вдосконалення стосуються підвищення оперативності визначення витоків в умовах малого відношення сигнал-завада, подолання потужних акустичних завад, врахування спотворень сигналів від пошкоджень при їхньому поширенні, визначення параметрів цього поширення і т.і. [1-3]. Для практичного відпрацювання запропонованих нововведень розробляється випробувальний апаратно-програмний комплекс у складі трьох незалежних компонентів, включаючи систему акустико-емісійного (АЕ) діагностування ЕМА-4.

Дані, які комплекс отримує в цифровій формі, дозволяють обробляти великі масиви вхідних даних і в реальному режимі часу визначити поточний стан трубопроводів та отримувати кількісні показники, які його характеризують.

Акустико-емісійні системи ЕМА кількох поколінь протягом багатьох років використовують у ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України. Виробництво та поставку приладів на замовлення і за технічним завданням ІЕЗ здійснює похідна від добре відомого у світі колишнього угорського підприємства Videoton компанія Gereb as Tarsa. Розроблена в ІЕЗ технологія оцінки стану матеріалу за даними АЕ дозволяє здійснити прогнозування руйнівного навантаження та залишкового ресурсу.

Розглянемо деякі особливості методики використання систем типу ЕМА-4 при їх застосуванні під час контролю трубопроводів систем водо- та теплопостачання. Методика передбачає використання систем ЕМА-4 у пасивному режимі (класичний метод АЕ) та у активному, коли об'єкт контролю сканується сигналами, які випромінюють по черзі ті ж самі датчики, які призначені для прийому АЕ інформації. Таким чином, першою перевагою методики є її швидкодія, оскільки вона не потребує заміни датчиків або вимірювального обладнання для проведення обох типів

обстеження, а лише корекції налаштувань програмного забезпечення АЕ системи у мінімальному обсязі.

Основне завдання випробувань – визначити поточну пошкодженість матеріалу, а далі за відомою номограмою перерахувати пошкодженість у залишковий ресурс (вказана процедура була автоматизована, розроблено спеціалізоване програмне забезпечення). Таким чином, доступна кількісна оцінка пошкодженості і ресурсу матеріалів.

Загальна схема АЕ випробувань пропонується наступна.

1. На базі технічного завдання на контроль певного об'єкта та його креслень вибираються оптимальні схеми розташування датчиків АЕ.

Слід враховувати, що основним об'єктом у разі контролю систем тепло- та водопостачання є елементи трубопроводів, найчастіше це лінійні фрагменти трубопроводів, які знаходяться під землею і до яких замовник робіт забезпечує тимчасовий доступ, або вирізані ділянки пошкоджених трубопроводів. Зазначимо, що поверхня, на яку встановлюють датчики АЕ, потребує попередньої підготовки. Ізоляція на ділянці встановлення датчика має бути знята, а само місце встановлення зачищене від бруду ті іржі. Достатньо наждачного зачищення, висока якість підготовки поверхні не потрібна. Ділянки для зняття ізоляції та зачищення необхідні невеликого розміру, відповідно до розміру датчиків АЕ (діаметр порядку 30 мм), заведення з'єднального кабелю та зручності встановлення і закріплення датчика.

Відзначимо суттєву перевагу методу АЕ. Для контролю заповненої рідиною або газом ділянки труби довжиною до 100 м зазвичай достатньо лише двох датчиків. Це пришвидшує процес налаштування контролю і дозволяє контролювати незначною кількістю датчиків великі ділянки.

Для АЕ контролю лінійних ділянок трубопроводів найбільш підходить лінійна схема розташування датчиків і відповідно спосіб лінійної локації джерел АЕ. Для контролю більш складних конфігурацій елементів трубопроводів локаційна схема підбирається індивідуально, відповідно до форми та розмірів об'єкта.

2. Запропонована схема розташування датчиків АЕ аналізується спеціальним ПЗ на предмет похибок визначення координат.

При застосуванні лінійної локації такий аналіз проводити не обов'язково. Накопичена база експериментальних даних показує, що для цього випадка похибка визначення координат складає не більше 5% від бази (відстані між найближчими один до одного датчиками).

3. Встановлення датчиків АЕ.

Датчики ДАЕ-01 виробляють двох типів – з магнітним кріпленням до об'єктів контролю, які проявляють феромагнітні властивості, та з кріпленням за допомогою спеціальної акустопрозорої речовини, яка утримує датчики на поверхні і в достатній мірі пропускає ультразвукові коливання в широкому спектрі частот (до 1000 кГц. Перевагу слід віддавати, за можливості,

кріпленню на магнітах як більш надійному і такому, що не призводить до часткового згасання амплітуд прийнятих сигналів.

4. Запропонована схема розташування датчиків АЕ тестується на об'єкті контролю.

Для тестування використовують вбудовані у кожний датчик генератори акустичних сигналів. Прилад ЕМА-4 і програмне забезпечення до нього дозволяють задіяти кожний з датчиків, підключених до приладу, у якості випромінювача тестових сигналів. Це дозволяє перевірити акустичний зв'язок між датчиками, а також реалізувати активний метод АЕ сканування об'єкта контролю.

При наявності акустичного зв'язку між датчиками у локаційній схемі формується так звана антена для визначення координат джерел АЕ (інформація від датчиків АЕ обробляється з урахуванням часового інтервалу між надходженням сигналів на кожний з них, на основі цього інтервалу вираховують координати джерела АЕ). При відсутності такого зв'язку вибирається схема зонної локації, коли кожний з датчиків АЕ отримує та обробляє АЕ інформацію незалежно від інших.

5. Випробування можна проводити трьома методами:

- При постійному навантаженні об'єкта контролю тиском або іншим чинником. Якщо під час випробувань тиск у елементі трубопровода є меншим за номінальний, є висока ймовірність, що дані АЕ будуть відсутні взагалі за рахунок тка званого ефекту Кайзера;
- При підйомі робочого тиску до рівня випробувального та подальшому скиді, відповідно до технічної документації на об'єкт. У програмі ЕМА-3 вмикають режим прогнозу руйнівного навантаження в разі можливості ввести в систему дані щодо поточного значення навантаження (у даному випадку – тиску). Рівень небезпеки, пошкодженість та прогнозне руйнівне навантаження за наявності акустичної активності на об'єкті контролю будуть показані кольором та цифрами на відповідному індикаторі;
- При відсутності акустичної активності у перших двох випадках або як додатковий (активний) метод виконується АЕ сканування, при якому один з датчиків АЕ виступає у ролі випромінювача, а інші – приймачів згенерованих сигналів. Пошкодженість матеріалу при цьому визначається за затуханням амплітуди прийнятих сигналів, зміною швидкості звуку та рядом додаткових параметрів (за потреби);
- За неможливості отримати дані попередніми способами пошкодженість об'єкта контролю може бути визначена шляхом використання альтернативних методів, зокрема за зміною товщини або твердості.

Надалі визначають, чи може об'єкт контролю працювати ще якийсь час, чи він потребує негайних заходів з ремонту або заміни. Для вирішення цього питання визначають пошкодженість та оціночний залишковий ресурс.

Пошкодженість [4, 5], подана як скалярна величина, вказує, наскільки та чи інша характеристика матеріалу контрольованого об'єкта змінилася

внаслідок експлуатаційного напрацювання, навантаження або впливу інших чинників.

На відміну від реального ресурсу, оціночний, або, іншими словами, прогнозований ресурс [6, 7] є величиною, яка може бути розрахована певним науково обгрунтованим способом, і в залежності від ряду факторів може змінюватися як в більший, так і в менший бік. Якщо потрібно подовжити експлуатацію виробу з гарантією безпеки на термін в один-два роки, а оціночний ресурс, з урахуванням обов'язкового запасу, який має бути встановлений для кожного типу виробу окремо, становитиме вдвічі-втричі більший термін, то прийняття рішення про можливість подальшої експлуатації при таких показниках буде в достатній мірі обгрунтованим.

Для умов, коли потрібно швидко визначити пошкодженість металу труб або інших елементів трубопроводів, зокрема системи тепло– та водопостачання, виконана автоматизація розрахункових формул [8, 9] для визначення пошкодженості та номограми для визначення оціночного залишкового ресурсу.

Розроблена програма [10] для MS Windows 32-бітних та 64-бітних версій дозволяє задати вже визначену або розрахувати пошкодженість матеріалу, отриману одним або декількома інструментальними методами, загалом до 10.

При розрахунку можна задати, яка саме пошкодженість буде використана у кінцевому варіанті – середня, мінімальна чи максимальна. Графіки у координатах «Пошкодженість – напрацювання» та «Пошкодженість – ресурс» дозволяють аналізувати конкретну криву для вибраного випадку розрахунку. Можливість зберегти отримані дані у файлах дозволяє вести банк даних відносно визначеної пошкодженості та ресурсу різних об'єктів контролю.

Програма є універсальною і не прив'язаною до конкретних типів об'єктів або їх фізичних та геометричних характеристик, що дозволяє використовувати її максимально широко, легко інтегрувати в системи оцінки стану і ремонту трубопроводів.

Таким чином, створено методику, яка дозволяє не лише виявляти пошкодження трубопроводів критичної інфраструктури, а й оцінювати їх залишковий ресурс.

Важливою перевагою методики є її гнучкість щодо умов застосування та зручність її інтегрування у наявну технологію експлуатації, діагностування та ремонтів обладнання, зокрема ділянок підземних трубопроводів. Це дає змогу вдосконалити існуючу оперативну діагностику об'єктів з довготривалою експлуатацією і за рахунок цього зменшити ризики виникнення аварійних ситуацій, що є актуальним враховуючи велику кількість таких об'єктів. З'являється можливість зручного доповнення типових технологічних операцій корисними діями діагностування, а саме:

- під час проведення гідравлічних випробувань ділянок трубопроводів використовувати зміну тиску у трубах не тільки для прояву послаблених

місць у вигляді витоків, а ще й для визначення як інших пошкоджень, так і загального ресурсу ділянки;

- після усунення витоку на ділянці трубопроводу, перед закопуванням труби, проводити не тільки звичайний ультразвуковий контроль якості зварних швів, а додатково визначати пошкодженість та ресурс як прилеглих до цих швів областей трубопроводу, так і ділянки після усунення витоку у цілому, тобто між тепловими камерами чи колодязями.

Методика може бути корисною при формуванні технічних актів з інструментального обстеження ділянок трубопроводів для прийняття рішень щодо можливості, умов та строків їхньої подальшої експлуатації, при планування черговості перекладань трубопроводів.

Автори висловлюють щиру подяку Національному фонду досліджень України за грантову підтримку, завдяки якій були виконані викладені дослідження в рамках проєкту №2023.04/0022.

1. Владимирський О.А., Владимирський І.А., Артемчук В.О., Криворучко І.П., Семенюк Д.М. Особливості і розвиток технологій виявлення витоків трубопроводів тепло- та водопостачання в умовах зношеності та мілітарних впливів. *Електронне моделювання.* 2024, 46(5), с. 64-73. URL: https://doi.org/10.15407/emodel.46.05.064.
2. Vladimirsky A.A., Vladimirsky I.A. Correlation parametric method for determining the velocity of acoustic wave propagation in a pipeline. *Електронне моделювання.* 2024, 46(6), с. 55. URL: https://doi.org/10.15407/emodel.46.06.055.
3. Владимирський О.А., Недосєка С.А., Зварич В.М., Артемчук О.В., Владимирський І.А., Криворучко І.П., Яременко М.А. Комплексна технічна діагностика як засіб вирішення проблем резильєнтності критичної інфраструктури *Резильєнтність динамічних систем*. Науково-практична конференція Інституту проблем моделювання в енергетиці ім. Г.Є. Пухова Національної академії наук України : матеріали (Київ, 27 грудня 2024 р.). Київ: ІПМЕ ім. Г.Є. Пухова НАН України, 2024. *-с224-228.* https://doi.org/10.5281/zenodo.14537092.
4. API 579-1/ASME FFS-1 (2016) “Fitness-for-Service.” Comprehensive standard for damage assessment for metal structures.
5. 20. DIN 50113:2009 “Testing of metallic materials — Evaluation of damage”.
6. ДСТУ 2860-94 «Надійність техніки. Терміни. Залишковий ресурс» .
7. ДСТУ 8646:2016 «Надійність техніки. Оцінювання та прогнозування залишкового ресурсу (строків служби) технічних систем».
8. Недосека С.А., Недосека А.Я. Комплексная оценка поврежденности и остаточного ресурса металлов с эксплуатационной наработкой. *Технічна діагностика та неруйнівний контроль,* 2010. №1, С. 9-16.
9. Недосека А. Я., Недосека С. А. Основы расчета и диагностики сварных конструкций: учебное пособие. 5-те изд., перераб. и доп. / под ред. Б. Е. Патона. Глава 7. Киев: Индпром, 2021. 94 с.
10. С.А. Недосека. Автоматизована оцінка залишкового ресурсу металу трубопроводів. *Електронне моделювання*. 2025, 47(5), с. 40-55. https://doi.org/10.15407/emodel.47.05.040.

О.В. Фаррахов, В.О. Ковач, Р.Г. Мелещенко, Ю.Б. Хапко, А.В. Сідельов

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ХВИЛЬОВОГО ВИЯВЛЕННЯ БЕЗПІЛОТНИХ УДАРНИХ ЗАСОБІВ

В основі оптимального виявлення хвильових сигналів радіоелектронними пристроями різного призначення лежить перевищення рівня прийнятого корисного сигналу I_{sign} над рівнем перешкод I_{hind}, що діють на вхід приймального пристрою [1] тобто має виконуватися умова:

$$I_{sign} \geq \delta \cdot I_{hind}\,, \tag{1}$$

де: δ – коефіцієнт розпізнавання, безрозмірна величина, що визначається в результаті обробки сигналу в приймальному радіоелектронному пристрої.

Права частина цього рівняння визначається чутливістю приймального пристрою – P_{rd}. Це значення зменшується за рахунок направленого прийому антеною системи радіоелектронного пристрою на величину, рівну коефіцієнту підсилення антени – K_{stren}. Ліва частина рівняння визначається потужністю I_{sign} хвильового демаскуючого сигналу, що випромінюється в простір. Оскільки хвильові ознаки поширюється за сферичним законом, їх фронт розширюється, а інтенсивність хвилі зменшується пропорційно квадрату поточної відстані.

Поширюючись у просторі, інтенсивність електромагнітної та акустичної хвилі зменшується за рахунок об'ємного згасання, величина якого визначається коефіцієнтом об'ємного згасання β.

Інтенсивність акустичного або інфрачервоного сигналу, що поширюється, може бути змінена на величину J_R. Інтенсивність акустичних шумів від дрону, що летить, буде вище з його задньої півсфери, а з носової – менше. Інфрачервоний демаскуючий сигнал з бічних напівсфер буде вищим, ніж з носової та задньої. Це викликано тим, що нагріта роботою двигуна внутрішнього згоряння бічна поверхня корпусу безпілотника більша, ніж носова або задня. Цей коефіцієнт отримав назву ракурсного.

З урахуванням всього вищевикладеного, вираз (1) набуде вигляду:

$$\frac{I_{sign}\, j_R}{\left(4\pi\, Д\right)^2} \cdot 10^{-0{,}1\cdot\beta\cdot Д_{km}} \geq \delta \cdot \frac{P_{rd}}{K_{stren}} \tag{2}$$

Виконаємо переведення виразу (2) у децибельну форму. Для цього зробимо логарифмування та множення на 10 обох частин виразу. У якому початкові рівні відстані – $Д_0$ дорівнює одному метру та інтенсивності – I_0 дорівнює одному Вату. Оскільки ці рівні залишаються стандартними у процесі всіх подальших перетворень, їх опускаємо. Інші величини безрозмірні. Зазначимо, що число π є константою, тому позначимо суму $20lg4\pi$ через $2K$, де $K \approx 10{,}98$ *дБ*.

Тепер вираз (2) набуде вигляду (3):

$$-\left(20\lg Д+\beta Д_{km}+2K\right)\geq$$
$$\geq-\left(10\lg I_{sign}+10\lg j_R-10\lg\delta-10\lg P_{rd}-10\lg K_{stren}\right) \quad (3)$$

Ліву частину цього виразу називають закономірністю спаду інтенсивності хвилі, що поширюється, і позначають як $\Psi(Д,f)$. Закономірність спаду інтенсивності теплової або інфрачервоної хвилі, що розповсюджується $\Psi_T(Д,f_T)$ – це математична залежність, що характеризує закономірність згасання цієї хвилі, за рахунок розширення сферичного фронту хвилі і її об'ємного згасання.

Права частина виразу (3) складається з п'яти доданків, що в децибельній формі виражають значення трьох головних технічних параметрів радіоелектронного пристрою, а саме тепловізора. Це коефіцієнт розпізнавання δ_T, чутливість його приймального пристрою P_{rdT}, коефіцієнта його посилення (спрямованої дії) – K_{stren}. Два доданки характеризують середню інтенсивність інфрачервоного випромінювання безпілотника I_T і ракурсного коефіцієнта інфрачервоного випромінювання j_T. Цю частину виразу (3) називають енергетичним потенціалом демаскуючого параметра і позначають як (4):

$$P_{ET}=\left(10\lg I_T+10\lg j_{RT}-10\lg\delta_T-10\lg P_{rdT}-10\lg K_{strenT}\right) \quad (4)$$

З урахуванням вищевикладеного справедливо (5):

$$\Psi_T\left(Д,f_T\right)\geq P_{ET} \quad (5)$$

Проводячи аналогічні міркування неважко отримати вираз (6) для опису дальності виявлення акустичного демаскуючого параметра ударних безпілотних засобів:

$$\Psi_A\left(Д,f_A\right)\geq P_{EA} \quad (6)$$

де: $\Psi_A(Д,f_A)$ – закономірність спаду інтенсивності акустичної хвилі (або шуму), що поширюється;

f_A – частота акустичного випромінювання, яка визначається як середнє геометричне нижньої та верхньої частоти інтервалу випромінювання;

P_{EA} – енергетичний потенціал демаскуючого акустичного параметра безпілотника.

Як і в вище наведеному випадку, він є результатом підсумовування п'яти доданків. Це коефіцієнт розпізнавання спрямованого мікрофона δ_A, чутливість його приймального пристрою P_{rdA}, коефіцієнта його посилення (спрямованої дії) – K_{stren}. Два доданки характеризують середню інтенсивність акустичного випромінювання (шуму) безпілотника I і ракурсного коефіцієнта акустичного випромінювання j_A.

Якщо розглядати електромагнітні хвилі, що випромінюється в простір то вони визначаються потужністю випромінюваного P_{er} електромагнітного імпульсу (радіолокаційного або лазерного) [2].

Оскільки антени РЛС та лазерного далекоміра має спрямованість, що характеризується коефіцієнтом посилення антени – K_{stren}, то поточне значення інтенсивності електромагнітної хвилі буде збільшено на величину, рівну коефіцієнту посилення антени.

Також для електромагнітні хвилі характерне об'ємного згасання, величина якого визначається коефіцієнтом об'ємного згасання β.

Ціль, що опромінюється електромагнітною хвилею, відображає тільки частину енергії, що падає на неї, яка визначається площею радіолокаційної поверхні, що відображає – S_{RO}, що може характеризуватися еквівалентною сферою поверхні, що відображає.

Оскільки електромагнітну хвилю відображає не вся поверхня, а лише її ракурсна частина S_{RO}, яка не перевищує половину всієї поверхні, що відображає, то величина відображеної електромагнітної енергії буде пропорційна S_{RO} від поточного значення інтенсивності.

Інтенсивність відображеної від цілі електромагнітної хвилі буде описуватиметься залежністю (7)

$$\frac{P_{er} \cdot K_{stren} \cdot S_{RO}}{\left(4\pi Д\right)^4} \cdot 10^{-0{,}2 \cdot \beta \cdot Д_{km}} \geq \delta \cdot \frac{P_{rd}}{K_{stren}}. \qquad (7)$$

Прологарифмувавши нерівність (7), помноживши обидві частини на 10, тобто, привівши в децибельний вигляд та як і в першій групі, виходячи з того, що число π є константою, позначимо суму $20lg4\pi$ через $2K$, де $K \approx 10{,}98$ *дБ*. Після нескладних перетворень остаточно отримаємо:

$$-20 \cdot \lg Д - \beta Д_{km} - 2K \geq$$

$$\geq \frac{1}{2}\left(10 \cdot \lg \delta + 10 \cdot \lg P_{rd} - 20 \cdot \lg K_{stren} - 10 \cdot \lg P_{er} - 10 \cdot \lg S_{RO}\right) \qquad (8)$$

Ліву частину виразу (8) називають закономірністю спаду інтенсивності електромагнітної хвилі, що поширюється, і позначають як $\Psi(Д,f)$.

Праву частину цієї нерівності прийнято також називати енергетичним потенціалом активного радіоелектронного пристрою за певною повітряною ціллю, який позначається як P_E.

Проводячи міркування, неважко отримати вираз (9) для опису дальності виявлення радіолокаційного демаскуючого параметра безпілотних ударних засобів терористичного впливу

$$\Psi_{Radar}\left(Д, f_{Radar}\right) \geq \frac{1}{2} P_{Radar} \qquad (9)$$

де: $\Psi_{Radar}(Д,f_{Radar})$ – закономірність спаду інтенсивності електромагнітної хвилі, що розповсюджується, яка випромінювана

радіолокаційною станцією на частоті f_{Radar}, *а* P_{RadarE} – енергетичний потенціал радіолокаційної станції за певною повітряною ціллю. Він складається з чотирьох характеристик станції радіолокації, а саме: коефіцієнта розпізнавання δ_{Radar}, чутливості приймального пристрою $P_{rdRadar}$, коефіцієнта посилення антени радіолокаційної станції – $K_{strenRadar}$, потужності випромінювання $P_{erRadar}$. І головного параметра радіолокаційної цілі, що опромінюється – її ракурсної поверхні, що відображає $S_{RORadar}$.

Подібним чином виходить вираз (10) для опису дальності виявлення лазерного демаскуючого параметра ударних засобів безпілотних засобів терористичного впливу.

$$\Psi_{LR}\left(Д, f_{LR}\right) \geq \frac{1}{2} P_{ELR} \tag{10}$$

де: $\Psi_{LR}(Д, \Psi_{LR})$ – закономірність спаду інтенсивності електромагнітної хвилі, що поширюється, яка випромінена лазерним далекоміром на частоті f_{LR}, а P_{ELR} – енергетичний потенціал лазерного далекоміра за певною повітряною ціллю. Він складається з чотирьох характеристик, а саме: коефіцієнта розпізнавання δ_{LR}, чутливості приймального пристрою P_{rdLR}, коефіцієнта посилення антени – $K_{strenLR}$, потужності випромінювання P_{erLR}. І головного параметра повітряної цілі, що опромінюється – її ракурсної поверхні, що відображає S_{ROLR}.

Тепер об'єднуючи в одну систему залежності (5), (6), (9) та (10) отримаємо шукану математичну модель (11)

$$\left.\begin{array}{c} \Psi_{T}\left(Д, f_{T}\right) \geq P_{ET} \\ \Psi_{A}\left(Д, f_{A}\right) \geq P_{EA} \\ \Psi_{Radar}\left(Д, f_{Radar}\right) \geq \frac{1}{2} P_{ERadar} \\ \Psi_{LR}\left(Д, f_{LR}\right) \geq \frac{1}{2} P_{ELR} \end{array}\right\} \tag{11}$$

Таким чином, математична модель хвильового виявлення безпілотних ударних засобів є системою з чотирьох однотипних функціональних залежностей. Кожна з них дозволяє послідовно визначати дальності виявлення інфрачервоного, акустичного, радіолокаційного та лазерного демаскуючих параметрів безпілотних ударних засобів.

1. Farrakhov, O., Lefterov, O., Strelets, V., Pecheny, V., Pomaza-Ponomarenko, A. (2025). Uniqueness Ensuring of Theoretical Solution to the Problem of Image Reconstructing of an Air Target Attacking Protected Object of Ukraine's Critical Infrastructure. In: Babak, V., Zaporozhets, A. (eds) Systems, Decision and Control in Energy VII. Studies in Systems, Decision and Control, vol 596. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-90462-2_9.

2. Diviziniuk, M., Mirnenko, V., Farrakhov, O., Shevchenko, O., Lesechko, D. (2023). Identification Process Features During Radar Observation Around Nuclear Objects. In: Zaporozhets, A., Popov, O. (eds) Systems, Decision and Control in Energy IV. Studies in Systems, Decision and Control, vol 456. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-22500-0_8.

O. Dzhyhun, O. Vasyliev

INTEGRATED MODELS OF ELECTRIC POWER SYSTEMS

Many problems related to the study of electric fields and media, as well as problems investigating dynamic processes in networks and systems, are described by integral equations, for which mathematical models in the form of ordinary differential equations and partial differential equations are traditionally used. Moreover, there are problems that are described in their formulation solely by integral equations.

Thus, there exists a certain class of problems where the use of integral equations proves to be more effective. In particular, using Volterra integral equations of the second kind in the construction of mathematical models of electrical networks allows for the analysis of dynamic modes by a method similar to the nodal voltage method for an electrical circuit [1]. At the same time, the application of integral equations in building mathematical models makes it possible to equally describe objects with both lumped and distributed parameters, and therefore to analyze transient processes in complex power systems that contain single-wire power transmission lines and lumped loads, based on unified mathematical models.

Integral models are distinguished by the compactness of the description of dynamic systems, with the relationship between input influences and output quantities being represented by integral operators, whose kernels are fully determined by the internal properties of the object, representing the system's response to typical signals. Moreover, the numerical solution of integral equations inherently has high stability and, in some cases, allows for the reduction of the dimensionality of certain problems [2].

A methodology has been developed for modeling transient processes in electrical circuits containing single-wire power transmission lines, which uses mathematical models of the line and the load in the form of second-kind Volterra integral equations, allowing solutions to be obtained in a numerical-analytical form.

The problems for which equations are used are similar to those applied in the analysis of dynamic modes in single-wire power transmission lines and are very diverse. These include, for example, the study of transient processes in the lines of high-speed computer circuits and other electronic equipment, which, due to the wide frequency spectrum of the transmitted signals, must be considered as lines with distributed parameters.

A widely known mathematical model of the processes occurring in such objects is a system of partial differential equations of the form:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + Ri + L\frac{\partial i}{\partial t} = 0, \quad \frac{\partial i}{\partial x} + Gu + C\frac{\partial u}{\partial t} = 0.$$

Traditionally used numerical and numerical-analytical methods for modeling and parametric optimization of resonance systems for electric power transmission via a single wire, which provide algebraization of integral-differential equations of integer, fractional, and mixed-order differential operators. The study of such a model consists of two main classes: methods based on the wave representation of the solution (wave methods) and methods that do not take into account the wave nature of a single-wire power transmission lines. Both approaches have their positive and negative properties. For instance, wave methods, having a physical representation of the transient process, do not allow it to be considered over a long time interval and do not provide the opportunity to represent the solution in analytical form over a certain segment. Methods that do not take into account the wave nature allow for the calculation of the transient process in a line without tracking the propagation of waves within it, but they require significant simplification of the original problem, for example, by neglecting distributed losses in the line. In addition, when using differential models for single-wire power transmission lines, difficulties arise when analyzing them together with circuits with lumped parameters. To study transient processes in circuits containing elements with both distributed and lumped parameters, an approach based on integral models can be used.

As a mathematical model for calculating transient processes in circuits with single-wire power transmission lines, it is proposed to use a system of Volterra integral slopes of the second kind. This model has a number of significant advantages: it allows the construction of individual numerical schemes for analyzing objects containing segments of single-wire power transmission lines connected in a network with concentrated loads at the nodes. Considering distributed active losses in the line using this approach does not complicate the computation process. The system of equations for currents $i_1(t), i_2(t)$ has the form:

$$i_1(t) = \frac{d}{d\tau}\int_0^t g_1(t-\tau)u_1(\tau)d\tau$$
$$i_2(t) = \frac{d}{d\tau}\int_0^t g_2(t-\tau)u_2(\tau)d\tau,$$

where g_1, g_2 are the transition conductivities that connect the currents and voltages u_1, u_2.

The basis of well-known approximate methods for solving integral equations is either analytical approximations of the functions involved in the equation or the approximation of the integration operation [3,4]. The first approach is implemented in methods based on the use of orthogonal polynomials of Laguerre, Legendre, and Chebyshev, while an example of the second is the quadrature method and its modifications. New mathematical methods for solving integro-differential equations that underlie mathematical models of dynamical systems are being intensively developed. Therefore, great attention will be paid to the development of new numerical-analytical methods of analysis, among which the

finite element and finite volume methods for solving boundary value problems in mathematical physics should be especially noted.

1. Carson J.R. Electric Circuit Theory and the Operational Calculus. London, 1926. https://www.academia.edu/1036817/Electric_circuit_theory_and_the_operational_calculus.
2. Верлань А.Ф., Сізіков В.С. Інтегральні рівняння: методи, алгоритми, програми. Довідковий посібник. Київ: Наук. думка, 1986 544 с.
3. Саух С.Є., Борисенко А.В., Джигун О.М. Модель мережі магістральних ліній електропередачі. Завдання планування розвитку електроенергетичних систем// Електронне моделювання, 2014. - **34**, № 4. - С. 3-14.
4. Саух С.Є., Джигун О.М Модель обчислень для визначення параметрів високовольтних ліній електропередачі у різних погодних умовах// Збірник наукових праць: Інститут проблем моделювання в енергетиці.-Київ –ІПМЕ ім.Г.Є. Пухова НАН України. Моделювання та інформаційні технології. Київ: 2018, Випуск. 85, с. 39-44.

В.В. Шкарупило, В.В. Душеба

КОНЦЕПЦІЯ РОЗГЛЯДУ ФУНКЦІЙНОЇ БЕЗПЕЧНОСТІ ПРИ ПРОЄКТУВАННІ КРИТИЧНОГО ПРОГРАМНО-АЛГОРИТМІЧНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ

Поняття функційної безпечності інтерпретується в контексті предметної області атомної енергетики. Воно розглядається як здатність розроблюваної/досліджуваної системи виконувати всі потрібні функції, важливі для безпеки, зберігати потрібні властивості та відповідати заданим характеристикам в усіх передбачених проєктом режимах й умовах експлуатації [1].

Етап проєктування як складовий етап процесу розроблення критичного програмно-алгоритмічного забезпечення опрацьовується у якості визначальної ланки, у межах якої формується архітектурна складова означеного забезпечення [2]. У якості «архітектури» розуміється сукупне поняття, що охоплює змістове навантаження понять «структура» та «відношення між елементами структури». У якості форм подання архітектурної складової на етапі проєктування розглядаються, у тому числі, UML-діаграми (Unified Modeling Language) дій, станів; блок-схеми алгоритмів [3].

Концепція будується навколо припущення, що передбачуваність функціонування розроблюваної/досліджуваної системи критичного призначення істотним чином визначається несуперечливістю відповідного програмно-алгоритмічного забезпечення. З позиції досягнення комплексності контролю несуперечливості на етапі проєктування, у відповідності до положень концепції багатовимірної верифікації, прийнято рішення опрацьовувати на вказаному етапі показники і функціональних, і нефункціональних характеристик [4]. Несуперечливість розглядається у якості досліджуваного показника функціональних характеристик. У якості засобів проведення автоматизованого контролю за означеними показникам залучаються формалізми TLA+ і PlusCal темпоральної логіки дій TLA (Temporal Logic of Actions), метод перевірки на моделі TLC (TLA Checker) [5], а також математичний апарат DEVS (Discrete Event System Specification) і відповідний інструментарій DEVS Suite – як засоби контролю показників нефункціональних характеристик (часових, матеріальних витрат, супутніх реалізації функціональних характеристик, що визначаються програмно-алгоритмічним забезпеченням) [6].

Для уможливлення контролю програмно-алгоритмічного забезпечення за показником несуперечливості в автоматизованому режимі синтезуються і опрацьовуються формальні специфікації на основі засобів TLA+ і PlusCal.

Результати формальної верифікації методом TLC поширюються на відповідні первинні артефакти (озвучені вище UML-діаграми, блок-схеми алгоритмів) на підставі застосування розробленого методу контролю архітектурної відповідності первинних артефактів і похідних від них формальних специфікацій [7].

Дослідження проведено в рамках вирішення задач наступних науково-дослідних робіт, виконуваних в Інституті проблем моделювання в енергетиці ім. Г.Є. Пухова НАН України: НДР № 0125U000326 «Розвинення теоретичних засад формалізації подань процесів опрацювання оперативної інформації в енергетиці»; 0125U002837 «Розвинення теоретичних засад забезпечення резильєнтності критичної енергетичної інфраструктури»; W911NF-22-2-0153 research work, funded by the US Army Engineer Research and Development Center (ERDC).

1. Про затвердження Вимог з ядерної та радіаційної безпеки до інформаційних та керуючих систем, важливих для безпеки атомних станцій: наказ Державної інспекції ядерного регулювання від 22.07.2015 № 140, із змінами, внесеними згідно з Наказом Державної інспекції ядерного регулювання № 508 від 25.11.2019. (2015). https://zakon.rada.gov.ua/laws/term/34229.
2. Shkarupylo, V., Blinov, I., Dusheba, V., & Alsayaydeh, J. A. J. (2023). Case driven TLC model checker analysis in energy scenario. *CEUR Workshop Proceedings*, 3392, 65–75. https://doi.org/10.32782/cmis/3392-6.
3. Shkarupylo, V.V., Blinov, I.V., Chemeris, A.A., Dusheba, V.V., & Alsayaydeh, J.A.J. (2022). On applicability of model checking technique in power systems and electric power industry. In A. Zaporozhets (Eds.), *Systems, Decision and Control in Energy III. Studies in Systems, Decision and Control* (pp. 3–22), 399. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-87675-3_1.
4. Шкарупило, В.В. & Душеба, В.В. (2022). Спадковість артефактів у контексті багатовимірної верифікації. *Тиждень науки-2022* (с. 789–791). НУ “Запорізька політехніка”.
5. Шкарупило, В.В., Душеба, В.В., Зайко, Т.А., Шкарупило, В.В., & Скрупський, С.Ю. (2024). Індуктивний підхід до побудови формалізованих подань програмно-алгоритмічного забезпечення при проєктуванні. *Вчені записки Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського, серія «Технічні науки»*, 35(74), 4, 224–229. https://doi.org/10.32782/2663-5941/2024.4/33.
6. Шкарупило, В.В., Душеба, В.В., Скрупський, С.Ю., & Блінов, І.В. (2022). Стратифікована модель подання нефункціональних характеристик системи критичного призначення при проєктуванні. *Електронне моделювання*, 44(2), 90–106. https://doi.org/10.15407/emodel.44.02.090.
7. Shkarupylo, V., Alsayaydeh, J.A.J., Tomičić, I., Chemeris, A., & Dusheba, V. (2021). A technique for checking the adequacy of formal model. *ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences*, 16(16), 1707–1719. http://www.arpnjournals.org/jeas/research_papers/rp_2021/jeas_0821_8670.pdf.

O.M. Kondratenko, V.A. Krasnov

ENGINEERING OF THE MOBILE DISASSEMBLY TEST BENCH FOR EXPERIMENTAL DETERMINATION OF THE ECOLOGICAL SAFETY LEVEL INDICATORS OF EXPLOITATION OF RECIPROCATING ICE OF FIREFIGHTING AND EMERGENCY-RESCUE VEHICLES

Relevance of the study. This area of research is fully characterized by the following 8 main points of justification of relevance [1]. Compliance with the Order of the State Emergency Service of Ukraine № 618 dated 09/20/2013 «On approval of the Regulations on the organization of environmental support of the State Emergency Service of Ukraine» [2], the Decree of the President of Ukraine № 722/2019 dated 09/30/2019 «On the Sustainable Development Goals of Ukraine for the period until 2030» [3], the Resolution of the Cabinet of Ministers of Ukraine № 476 dated 04/30/2024 «On approval of the list of priority thematic areas of scientific research and scientific and technical developments for the period until December 31 of the year following the termination or abolition of martial law in Ukraine» [4], the Specialty Passport of 21.06.01 «Ecological Safety», approved by Resolution of the Presidium of the Higher Attestation Commission of Ukraine № 33-07/7 dated 04.07.2001 [5], the Law of Ukraine № 3769-IX dated 04.06.2024 «On Amendments to Some Laws of Ukraine Regarding the Mandatory Use of Liquid Biofuels (Biocomponents) in the Transport Sector» [6], the Standard of Higher Education in Specialty 183 «Environmental Protection Technologies» of the Third (Educational and Scientific) Level in the Field of Knowledge 18 «Production and Technologies», approved by Order of the Ministry of Education and Science of Ukraine № 1427 dated 23.12.2021 [7], the Topics of Scientific Research and Scientific and Technical (Experimental) Developments for 2025-2029, approved by Order of the Ministry of Internal Affairs of Ukraine № 326 dated 21.05.2024 [8], the Civil Protection Code of Ukraine in its current version dated 12.09.2025, Article 108 [9].

Purpose of the study. To enhance the ecological safety (ES) indicators of the exploitation process of power plants (PP) with reciprocating internal combustion engines (RICE) – particularly in firefighting and emergency-rescue vehicles (FERV) operated by the State Emergency Service (SES) of Ukraine and other security and defense sector institutions – through the development of a mobile disassemblable test bench (MDTB). This test bench will facilitate experimental investigation of the technical, economic, and ecological characteristics of such PP with RICE, including FERV units, as well as the performance of executive devices of environment protection technologies (ETP), both during armed conflict and throughout the post-war reconstruction of national infrastructure and economy.

Object of the study. A set of technical, economic, and ES factors associated with the exploitation of PP with RICE – including FERV operated by divisions and institutions of the SES of Ukraine – under both routine conditions and in remote or conflict-affected areas, alongside performance and efficiency indicators of executive devices of ETP, serve as key elements for the complex criteria-based assessment of ES levels and for the validation of corresponding mathematical models.

Subject of the study. Design, metrological, and performance parameters of the MDTB is engineered for the experimental determination of key physical quantities related to the object of study. Its design includes modular components for rapid deployment and transportability.

Metrological parameters ensure compliance with national and international standards for measurement accuracy and reproducibility. Performance characteristics encompass the capability to simulate real-world operational modes of PP with RICE, including those in FERV configurations, enabling precise evaluation of technical, economic, and ecological safety indicators. The developed mobile disassembly test bench and measuring equipment for it is given on the Fig. 1. Design and manufacturing process of the developed mobile disassembly test bench is given on the Fig. 2. Results of participation in exhibition events is given on the Fig. 3.

Figure 1. – The developed mobile disassembly test bench and measuring equipment for it [1]

This research was conducted within the framework of the scientific project «Development of a Methodology for Complex Assessment of the Environmental Impact of the Operation and Use of Special Equipment under Conditions of Military Aggression» (State Registration № 0124U000374). The results of the

study have found the following practical implementation: a) in the production and economic activities of LLC «TELECOM COMPLEX» (certificate of use dated 10.03.2025); b) in the educational process of the Department of Environmental Protection Technologies of the Educational and Scientific Institute of Management and Population Safety of the NUCP of Ukraine of SES of Ukraine (certificate of use dated 26.06.2025);

Figure 2. – Design and manufacturing process of the developed mobile disassembly test bench

Figure 3. – Results of participation in exhibition events

c) in the official activities of the Interregional Rapid Response Center of the State Emergency Service of Ukraine (certificate of use dated 19.05.2025); d) in the general activities of the Municipal Enterprise of the executive body of the Kyiv City Council (Kyiv City State Administration) for the protection, maintenance and exploitation of the lands of the water fund of the city of Kyiv «PLESO» (certificate of use dated 26.05.2025).

REFERENCES

1. Kondratenko O., Krasnov V. (2025) Development of the mobile disassembly test bench for experimental studyof the ecological safety level of exploitation of firefighting and emergency-rescue equipment with reciprocating ICE and the performance characteristics of the executive devices of EPT. Technogenic and ecological safety, 17(1/2025), 3–15. doi: 10.52363/2522-1892.2025.1.1.
2. Order of the State Emergency Service of Ukraine No. 618 (with amendments) dated September 20, 2013 «On approval of the Regulations on the organization of environmental support of the State Emergency Service of Ukraine». URL: https://zakon.rada.gov.ua/rada/show/v0618388-13#Text.
3. Decree of the President of Ukraine № 722/2019 dated 30/09/2019 «On the Sustainable Development Goals of Ukraine for the period until 2030». URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/722/2019#Text.
4. Resolution of the Cabinet of Ministers of Ukraine № 476 of 04/30/2024 «On approval of the list of priority thematic areas of scientific research and scientific and technical developments for the period until December 31 of the year following the termination or abolition of martial law in Ukraine». URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/476-2024-%D0%BF#Text.
5. Specialty passport 21.06.01 «Ecological safety», approved by the Resolution of the Presidium of the Higher Attestation Commission of Ukraine № 33-07/7 dated 04.07.2001. URL: https://zakon.rada.gov.ua/rada/show/va7_7330-01#Text.
6. Law of Ukraine № 3769-IX dated 04.06.2024 «On Amendments to Certain Laws of Ukraine Regarding the Mandatory Use of Liquid Biofuels (Biocomponents) in the Transport Sector». URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/3769-20#Text.
7. Standard of higher education in specialty 183 «Environmental Protection Technologies» of the third (educational and scientific) level in the field of knowledge 18 «Production and Technologies», approved by Order of the Ministry of Education and Science of Ukraine № 1427 dated 12/23/2021. URL: https://mon.gov.ua/static-objects/mon/sites/1/vishcha-osvita/zatverdzeni%20standarty/2021/12/24/183-Tekhn.zakh.navk.seredovyshcha-dokt.filos.pdf.
8. Topics of Scientific Research and Scientific and Technical (Experimental) Developments for 2025-2029, approved by Order of the MIA of Ukraine № 326 dated 21.05.2024. URL: https://mvs.gov.ua/normativno-pravovi-akti/nakaz-mvs-vid-21052024-326-pro-zatverdzennia-tematiki-naukovix-doslidzen-i-naukovo-texnicnix-eksperimentalnix-rozrobok-na-2025-2029-roki.
9. Civil Defense Service Oath (Civil Defense Code of Ukraine in the current version of September 12, 2025, Article 108. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/5403-17#Text.

О.А. Владимирський, В.М. Зварич, С.А. Недосєка, В.О. Артемчук,
І.А. Владимирський, Д.М. Семенюк, І.П. Криворучко

ЗАХОДИ ЩОДО ВПРОВАДЖЕННЯ НОВИХ ЗАСОБІВ ДІАГНОСТУВАННЯ ПІДЗЕМНИХ ТРУБОПРОВОДІВ

В ІПМЕ ім. Г.Є. Пухова НАН України при грантовій підтримці НФДУ 30.11.2025р. завершується проект 2023.04/0022 «Розроблення апаратно-програмного комплексу та методики оперативного виявлення пошкоджень систем тепло- та водопостачання з врахуванням їх зношеності та мілітарних впливів». Отримані авторами науково-технічні результати відображені у публікаціях, зокрема у [1, …, 6]. У ході роботи створено діагностичний апаратно-програмний комплекс, який призначений для вирішення двох актуальних завдань: оперативного виявлення витоків та визначення пошкодженості та ресурсу трубопроводів тепло- та водопостачання. Основна увага при створенні комплексу приділялась врахуванню ускладнень та особливостей діагностування мереж в умовах значного зносу технологічного обладнання та наслідків військових дій. Робота проведена у кілька етапів. Поточний етап присвячений кінцевій меті проекту - впровадженню потрібних на сьогодні результатів проекту у практичну, виробничу діагностику.

Впровадження результатів, у свою чергу, є процесом, який теж містить кілька необхідних етапів. Розглянемо їх на прикладі виконання означеного проекту.

З мети роботи – впровадження діагностичного комплексу та методики його застосування випливає їх пропонування потенційним замовникам. Різні замовники мають свої особливості застосування. Тому важливою є відповідна класифікація об’єктів та умов діагностування для окреслення пропонованих можливостей нового комплексу щодо кожній галузі. У даному випадку це:

- магістральні теплові мережі з великими діаметрами трубопроводів;
- розподільчі теплові мережі з середніми та малими діаметрами труб, трубопроводи теплопостачання;
- трубопроводи гарячого водопостачання (ГВП);
- трубопроводи холодного водопостачання (ХВП).

Розглядаючи ці різновиди найбільш поширених трубопроводів з точки зору особливостей їхнього діагностування, важливими є:

- діапазон використаних діаметрів труб;
- матеріал основної труби;
- тип гідро та теплоізоляції;

- вид прокладання, тобто прокладання безканальне чи у непрохідних каналах.
- глибина прокладання;
- робочий тиск;
- джерела акустичних завад.
- Для того, щоб конкретизувати пропозиції та перевірити практичні можливості створених засобів, виконано наступне:
- Розроблені засоби пройшли перевірку у лабораторних умовах на синтезованих тестових сигналах та на записах акустичних сигналів реальних пошкоджень трубопроводів. Перевірено різноманітні аспекти працездатності апаратно-програмних засобів в умовах завад та різних обмежень.
- Відпрацьовано методику роботи на трубопровідному полігоні. Для цього використано ділянку діючої тепломережі з фізичними акустичними імітаторами пошкоджень та завад.
- Виконано діагностичні роботи на реальних аваріях підземних трубопроводів у м. Києві, зокрема:
- ділянки трубопроводу ГВП за адресою: вул. Набоки 3,
- двох ділянок теплопостачання по вул. Садово-Ботанічної (Тимірязівської) 1;
- ділянки ГВП по вул. Зоологічної 3;
- ділянки водопроводу по вул. Зоологічної 10;
- розгалуженої ділянки трубопроводу теплопостачання за адресою: Столичне Шосе, 215;
- ділянки трубопроводу ХВП за адресою: вул. Деміївська 49;
- водопроводу у військових містечках №** та №**;
- теплопостачання за адресою: вул. Дегтярівська 19/7;
- теплопостачання за адресою: вул. Пухівська 7;
- теплопостачання за адресою: вул. Генерала Генадія Воробьева, 13А.

За результатами проведених обстежень, за участю замовників, складено технічні акти з вказаними координатами пошкоджень, результатами розтинів підземних трубопроводів для оперативного усування пошкоджень та висновками щодо точності проведеного діагностування. Всі висновки позитивні.

За результатами проведених випробувань внесено корекції до розроблених засобів та методики діагностування для більш оперативного, якісного та зручного застосування у польових умовах.

Проведені випробування та корегування дозволили уточнити зміст документів з оформлення юридичних прав на створені об’єкти інтелектуальної власності (ОІВ). Поточний стан оформлення наведено у таблиці 1.

Для забезпечення можливості впровадження нових апаратно-програмних та методичних діагностичних засобів у виробничу практику

підприємств, які здійснюють експлуатацію підземних водопроводів, теплових мереж та різних технологічних трубопроводів проводиться аналіз можливостей та відпрацювання способів тиражування розробленого апаратно-програмного комплексу, аналіз умов забезпечення його фінансової доступності для потенційних споживачів.

Таблица 1. – Стан оформлення ОІВ

ОІВ	Стадія оформлення
Патент на корисну модель	Отримано, №160421 від 10.09.2025р.
	Заявка на етапі підготовки – 1 шт.
Науковий твір (Аналітичний огляд, Методики)	Зареєстровані заявки – 1 шт № с202508057 від 18.09.2025р.
	Етап підготовки заявки – 3 шт.
Компьютерні програми	Отримано свідоцтв – 2 шт. №132954 від 03.02.2025р, №137116 від 17.06.2025р;
	Зареєстровано заявки – 2 шт. № с202508054 від 18.09.2025р, № с202508910 від 14.10.2025р.
	Етап підготовки заявок – 2 шт.

Так, апаратно програмний комплекс (АПК) «РАСТР-2В» виготовлений в ІПМЕ ім. Г.Є. Пухова НАН України в одному екземплярі. При надходженні замовлень він може тиражуватись Інститутом у кооперації з партнерськими організаціями (випереджальна закупівля комплектуючих, замовлення механіки, плат з електронікою та інше) у кількості до 6 шт. на рік. АПК «РАСТР-2В» має виняткові діагностичні характеристики, але досить дорогий і об'ємний. Він містить три станції багатоканальної реєстрації на базі убудованих мініноутбуків, потужний генератор і акустичні випромінювачі, станцію з обробки даних. Він призначений для застосування виключно у складі автомобільних діагностичних лабораторій з пошуку пошкоджень підземних трубопроводів у найскладніших умовах. Його застосування потребує високої кваліфікації персоналу.

Більш доступним за вартістю, більш простим у застосуванні, з меншим об’ємом апаратури, також розглядається варіант застосування Параметрического корреляционного течешукача К-10.5М3 з оновленою версією програмного забезпечения і з розширеною комплектацією, яка містить: блок оператора з потужним ноутбуком, дві спеціалізовані радіостанції для передачі віброакустичних даних, компактний генератор зондувальних сигналів трубопроводів з потужним та економічним підсилювачем класу “D” з акустичними випромінювачами. Такий варіант поступається АПК «РАСТР-2В» за функціоналом та метрологічними характеристиками, має меншу кількість каналів реєстрації акустичних

сигналів. Проте його можна застосовувати у складних випадках діагностування подібно АПК «РАСТР-2В», при цьому багато точкові вимірювання на об'єкті доведеться проводити послідовно. Такі модернізовані прилади можна виготовляти до 12 шт. на рік і більше.

Планується декілька варіантів впровадження отриманих за проектом результатів. Найскоріший з них виглядає наступним чином.

Розроблені ІПМЕ ім. Г.Є. Пухова течешукачі у базовій комплектації типу К-10.5М2 і К-10.5М3 вже використовують підприємства України на протязі кількох років. Тому цим підприємствам надсилаються пропозиції безоплатного встановлення нової версії програмного забезпечення. Користувач відразу отримує частину нового функціоналу з останньою параметричною обробкою кореляційних функцій. У подальшому, при замовленні щодо додаткової комплектації генератором та випромінювачами зондувальних сигналів трубопроводів, замовник, витрачаючи мінімум коштів, отримує повнофункціональний розширений комплект течешукача.

Термоакустичний течешукач А-10Т3 може постачатись у кількості до 20 та більше комплектів на рік.

Відпрацьовуються варіанти комплектації діагностичного комплексу також засобами акустико-емісійного діагностування. Розглядаються прилади «ЕМА-4» закордонного виробництва та альтернативне використання аналогів вітчизняного виробництва.

З метою інформування потенційних споживачів проводяться різні інформаційні та рекламні заходи. Так, змістовна інформація про створений діагностичний комплекс демонструвалась на виставці «ECOENERGY EXPO — 2025», яка проходила у м. Києві у жовтні.

З метою підготовки до навчання персоналу створено методику застосування розробленого комплексу приладів, яка складається з двох частин: пошук витоків і визначення пошкодженості та ресурсу мереж тепло- та водопостачання. Опрацьовано питання проведення навчання персоналу на ділянках теплової мережі.

1. Владимирський О.А., Владимирський І.А., Артемчук В.О., Криворучко І.П., Семенюк Д.М. Особливості і розвиток технологій виявлення витоків трубопроводів тепло- та водопостачання в умовах зношеності та мілітарних впливів. Електронне моделювання. 2024. 46 (5). С.64-73. URL: https://www.emodel.org.ua/images/em/46-5/46-5-5.pdf.
2. Vladimirsky A.A, Vladimirsky I.A. Correlation parametric method for determining the velocity of acoustic wave propagation in a pipeline. Електронне моделювання. 2024. 46 (6). С.55-63. URL: https://www.emodel.org.ua/images/em/46-6/46-6-5.pdf.
3. Патент на корисну модель № 160421; G01M 3/24; G01M 3/18; F17D 5/02. Параметричний кореляційний спосіб визначення фактичного значення швидкості поширення акустичних хвиль гідравлічного удару по трубопроводу. Публ. 10.09.2025, Бюл. №37. Владимирський О.А, Владимирський І.А. URL:https://sis.nipo.gov.ua/uk/search/detail/1875550/.

4. Владимирський О.А., Владимирський І.А. Адаптація кореляційних течешукачів до діагностування в умовах мілітарних впливів та зносу трубопроводів тепло- та водопостачання. Електронне моделювання. 2025. 47 (3). С.67-78. URL:https://www.emodel.org.ua/uk/archive-ukr/2025/47-3-u/c-67-78.
5. Недосєка С.А. Автоматизована оцінка залишкового ресурсу металу трубопроводів. Електронне моделювання. 2025. 47 (5). С.40-55. https://doi.org/10.15407/emodel.47.05.040.
6. О.А. Владимирський, В.М. Зварич, І.А. Владимирський, В.О. Артемчук. Напрямки розвитку оцінювання та застосування кореляційного зв'язку між сигналами у системах технічного діагностування. Технічна електродинаміка. 2025, № 6, с. 94-101. https://doi.org/10.15407/techned2025.06.094.

В.Р. Сенченко, А.В. Бойченко, Д.С. Ардашов,

КАСКАДНИЙ ЕФЕКТ КРИТИЧНОЇ ІНФРАСТРУКТУРИ НА ПРИКЛАДІ ЗБОЮ AWS

Останнім часом все більше дослідників приходять до усвідомлення того, що в більшості сфер життєдіяльності суспільств критичні інфраструктури (КІ) тісно пов'язані. Особливо це проявляється при об'єднанні хмарних інфраструктур з іншими типами КІ (енергетичні, транспортні, логістичні, фінансові, урядові). Виявлення прихованих зв'язків між пов'язаними КІ має першорядне значення для ефективного управління ризиками, планування резильєнтності та запобігання катастрофічним каскадним ефектам [1].

Каскадний ефект (КЕ) – послідовність відмов у суміжних або залежних КІ, яка виникає внаслідок окремого збою. Ознаками КЕ є швидко зростаючий масштаб наслідків, взаємозалежності між підсистемами і погіршення стану через тяжіння до «снігової кулі». Причинами КЕ можуть бути відсутність ізоляції відмов, недосконала архітектура та надмірна залежність між підсистемами [2].

За оцінками досліджень, у 2023 році хмарні внесли понад 1 трлн доларів у глобальний ВВП, а до 2030 року їхній внесок може сягнути $12 трлн [2].

Amazon Web Services (AWS) – на даний момент один з лідерів хмарних обчислень. Ресурси AWS розміщуються на всіх континентах та ієрархічно поділяється на регіони, зони доступності (AZ) та кінцеві точки (edge locations), які підтримують масштабовані сервіси як DynamoDB, EC2, Lambda, S3, RDS. Глобальна архітектура AWS базується на жорсткій сегментації, реплікації даних і балансуванні навантажень між регіонами, що забезпечує стійкість та високу доступність [3].

AWS має приблизно 30 % частки глобального ринку хмарної інфраструктури станом на середину 2025 року [4]. Ключові сектори КІ багатьох держав – фінанси, електронна комерція, медіа, логістика, державні служби істотно залежать від AWS. Багато організацій розгортають свої сервіси на AWS, використовуючи його для обчислень, баз даних, аутентифікації та оркестрації мікросервісів.

20 жовтня 2025 року AWS зазнала серйозного збою, що вплинув на тисячі організацій по всьому світу.

За офіційними даними AWS [5], першопричиною збою стала помилка в автоматизованій підсистемі управління DNS-записами сервісу баз даних DynamoDB – в результаті некоректного опрацювання конкурентних запитів на оновлення DNS-планів система перестала вирішувати регіональну адресу. Це призвело до масового накопичення невдалих запитів, що спричинило ланцюгову реакцію затримок та тайм-аутів [6].

Друга хвиля хвиля КЕ охопила внутрішні сервіси AWS, які використовували DynamoDB як бекенд і не могли підключитися до неї. Amazon EC2 не припинив вчасно виділяти віртуальні сервери для розгортання застосунків. AWS Lambda не змогла вчасно виконувати

програмний код у відповідь на події. Network Load Balancer критиично сповільнив автоматичний розподіл вхідного мережевого трафіку між цільовими ресурсами.

Третя хвиля КЕ подіяла на системи автентифікації та авторизації (AWS STS, IAM) та інші сервіси обробки даних, такі як Redshift, ECS/EKS та Fargate. Збої в цих компонентах призвели до затримок у аналітичних обчисленнях, що негативно позначилося на системах прогнозування попиту та управління запасами в ритейлі та дистрибуції.

Четверта хвиля КЕ проявилася на рівні кінцевих споживачів. Недоступність Signal, Snapchat, Reddit, Coinbase, Alexa та Prime Video та інших сервісів – спричинила масові скарги, зниження довіри до хмарних платформ і порушення цифрової комунікації. Неможливість отримання тимчасових облікових даних порушило роботу логістичних платформ, які використовують автоматизовані запити до API для відстеження вантажів та управління складами. У фінансовому секторі блокування доступу до обчислювальних ресурсів викликало затримки в обробці платежів. [7].

Остаточні наслідки КЕ для клієнтів AWS виявилися критичними: збій веб-застосунків, затримки у фінансових транзакціях, перебої у доставці контенту, порушення логістичних ланцюгів, вимушене переключення на аварійні сценарії. Клієнти змушені були витратити значні рескрси на відновлення, вивантаження черг і стабілізацію роботи своїх продуктів [8].

Аналіз даного прикладу показує, що концентрація залежностей від основних хмарних регіонів призводить до системних ризиків. Бізнесу рекомендується впроваджувати багаторегіональні структури з повною автономією, проводити регулярні тести стійкості і автоматизувати план відновлення. Архітектура має передбачати ізоляцію відмов і резервування критичних компонентів. Висновки для України полягають у необхідності розвитку власної хмарної інфраструктури та зниження залежності від закордонних хмарних сервісів.

Дослідження подібних КЕ вимагає розробки комплексної методології виявлення прихованих зв’язків та взаємозалежностей між КІ системами. Враховуючи зростаючу складність і взаємопов’язаність сучасної інфраструктури – зокрема в у сфері хмарних сервісів пропонується застосувати для системного представлення та аналізу таких взаємозалежностей методи семантичного моделювання, що дозволить виявити латентні зв’язки, які часто залишаються поза увагою традиційних методів аналізу, тим самим сприяючи підвищенню обізнаності, оцінці ризиків та плануванню стійкості. Це сприяє виявленню потенційних вразливостей і шляхів поширення відмов, що охоплюють кілька секторів інфраструктури, підтримуючи проведення більш надійної оцінки ризиків і планування.

1. Бойченко А.В., Сенченко В.Р. Дослідження взаємозв'язків об'єктів критичної інфраструктури. Міжнародна науково-практична конференція «Живучість та резильєнтність – 2023». Збірник матеріалів конференції. Київ. 2023. – с. 102-103.
2. Хоменко О.М., Сенченко В.Р., Коваль О.В. Мережевий підхід при дослідженні каскадних ефектів критичних інфраструктур ISSN 1560-9189 Реєстрація, зберігання і обробка даних, 2024, Т. 26, № 2, Сс 44-71.
3. Kewate, N., Raut, A., Dubekar, M., Raut, Y., & Patil, A. (2022). A review on AWS-cloud computing technology. International Journal for Research in Applied Science and Engineering Technology, 10(1), 258-263.
4. Fowler, B. (2023). AWS for Public and Private Sectors. Apress LP.
5. Amazon Web Services. Summary of the Amazon DynamoDB Service Disruption in the Northern Virginia (US-EAST-1) Region. Досупно: https://aws.amazon.com/ru/message/101925/.
6. Borngreat-Mensah, P.E.T.E.R. (2025). Mitigating Cloud Centralization Risks: A Case Study Of The October 20, 2025 Aws Outage Using A Multi-Cloud Dependency Mitigation Framework (Mcdmf).
7. David R Oliver. Architectural Lessons from the AWS October 2025 Outage. Досупно: https://medium.com/@davidroliver/architectural-lessons-from-the-aws-october-2025-outage-88a2dd104dd2.
8. AWS Outage October 2025: What Caused It and How to Future-Proof Your Business. Досупно: https://deployflow.co/blog/aws-outage-october-2025-what-caused-future-proof-business/.

О. Любименко, О. Штепа

ШТУЧНИЙ ІНТЕЛЕКТ У КЕРУВАННІ ВОДНЕВИМИ ПОТОКАМИ ЧЕРЕЗ МЕМБРАНИ ТА ОЦІНЦІ РИЗИКІВ

Стрімкий розвиток водневої енергетики зумовлює підвищені вимоги до точності, надійності та безпеки процесів селективного транспортування водню через мембранні системи. Паладієві та паладійвмісні мембрани забезпечують високий рівень очищення та контрольовану подачу водню, проте їх робота супроводжується складними фізико-хімічними процесами, що залежать від тиску, температури, концентрації та стану матеріалу. Підвищення або зниження тиску навіть на невелику величину може призвести до небажаних фазових переходів у паладієвих мембранах, деградації матеріалу та порушення технологічного режиму. Температурні коливання, зміни концентрації водню та утворення α- і β-фаз у Pd–H системах значно впливають на ефективність і надійність транспортування водню. При цьому традиційні методи моніторингу, які базуються на локальних датчиках та періодичних вимірюваннях, не забезпечують достатньої швидкості реакції на зміни режиму та не дозволяють прогнозувати аварійні ситуації заздалегідь.

У роботі розглянуто можливості застосування штучного інтелекту для автоматизованого керування водневими потоками через мембрани та трубопроводи і для моделювання потенційно небезпечних станів. ШІ здатен вирішувати низку критичних завдань, що традиційними методами контролю виконуються неефективно або з великими затримками [1].

Нейронні мережі дозволяють моделювати складні взаємозв’язки між ключовими параметрами водневої системи — тиском, температурою, концентрацією водню та швидкістю потоку. Завдяки цьому можлива побудова точних часових моделей динаміки водневих потоків, що дозволяє прогнозувати майбутні значення параметрів і попереджати відхилення від оптимальних режимів. Це особливо важливо для паладієвих мембран, чутливих до змін концентрації та температури, оскільки навіть незначні відхилення можуть призвести до деградації матеріалу або появи залишкових деформацій.

Алгоритми машинного навчання (ML) забезпечують виявлення аномалій у режимі реального часу. Наприклад, на основі аналізу даних сенсорів ШІ може ідентифікувати нетипові зміни тиску або витоки водню ще до того, як вони переростають у аварійну ситуацію. Такі алгоритми можуть навчатися на історичних даних роботи системи, розпізнавати закономірності та створювати моделі поведінки, що враховують сезонні коливання, зміни навантажень та інші фактори, які впливають на експлуатацію установки.

Ефективне застосування штучного інтелекту у керуванні водневими потоками неможливе без розвиненої цифрової інфраструктури моніторингу, яка забезпечує постійний збір та обробку даних про стан системи. Інтеграція сенсорів є ключовим елементом цифрового моніторингу. Сучасні установки

оснащуються датчиками тиску, температури, концентрації водню, а також датчиками деформації мембран і трубопроводів. Дані з цих сенсорів передаються на центральну платформу ШІ, де відбувається їх обробка, виявлення аномалій та прогнозування потенційних ризиків.

IoT-технології забезпечують безперервну передачу даних із розподілених сенсорних вузлів. Інтернет речей дозволяє відстежувати стан системи у режимі реального часу, передавати великі масиви інформації на сервери для аналізу, а також підтримувати інтеграцію з зовнішніми системами контролю та безпеки. Це дозволяє миттєво реагувати на зміни параметрів і запобігати розвитку аварійних ситуацій.

Цифрові близнюки водневих установок є ще одним ефективним інструментом моніторингу. Цифровий близнюк — це віртуальна копія реальної установки, яка моделює її поведінку за різних умов експлуатації. Використання цифрових близнюків дозволяє прогнозувати вплив зміни тиску, температури, концентрації водню та навантажень на критичні елементи системи, оцінювати залишкові ресурси мембран та трубопроводів, а також оптимізувати режими роботи без ризику для реальної установки.

Завдяки цифровим системам моніторингу ШІ здатен:

– виявляти навіть незначні відхилення від нормального режиму;

– прогнозувати розвиток потенційно небезпечних ситуацій;

– забезпечувати оптимізацію роботи водневих систем у реальному часі;

– підвищувати надійність і довговічність критичних компонентів, таких як мембрани та трубопроводи.

Таким чином, оцінка ризиків у водневих технологіях є критично важливою через високі експлуатаційні ризики, пов’язані з реактивністю водню, його здатністю проникати через матеріали та можливістю утворення вибухонебезпечних сумішей. Традиційні методи оцінки ризиків часто базуються на статистичних даних або періодичних оглядах, що не дозволяє прогнозувати аварійні стани у реальному часі. Використання штучного інтелекту відкриває нові можливості для проактивного управління безпекою водневих систем. Завдяки інтеграції ШІ у оцінку ризиків забезпечується:

– своєчасне виявлення потенційно небезпечних режимів;

– мінімізація ймовірності аварій та витоків водню;

– оптимізація експлуатації водневих установок із врахуванням безпеки та довговічності обладнання;

– перехід від реактивного до проактивного управління безпекою водневих систем.

1. «Штучний інтелект в енергетиці», національний інститут стратегічних досліджень, 2022 р., https://niss.gov.ua/sites/default/files/2022-07/dopovid-ai-venergetici-red_01-pogodzheno-sukhodolya_02-1.pdf.
2. «Перспективи застосування штучного інтелекту для покращення енергозбереження в умовах україни», 2024 р., http://inneco.org/index.php/innecoua/article/view/1246/1349.

В.В. Мохор, О.В. Цуркан, Р.П. Герасимов, В.П. Яшенков, Т.М. Клименко

ЖИТТЄВИЙ ЦИКЛ АТАКИ СОЦІАЛЬНОЇ ІНЖЕНЕРІЇ

Типове тлумачення життєвого циклу зводиться до еволюціонування системи, продукту, послуги, проєкту або іншої сутності, які створюються людиною від концепції до списання [1]. Характерними особливостями даної дефініції є орієнтованість на сутність. Вона створюється і підтримується людиною. Залежно від її орієнтованості або призначення виокремлюються як позитивний, так і негативний аспекти [2]. Останній асоціюється з інтерпретуванням атаки, зокрема, соціальної інженерії, як сутності – від задуму до реалізування. Тому визначання життєвого циклу атаки соціальної інженерії є актуальним завданням.

Життєвий цикл відображає еволюціонування атаки соціальної інженерії зловмисником від задуму до завершування (рис. 1 [3]). Це означає, що з огляду на обрану "потенційну жертву" продумується послідовність відповідних дій для отримання "санкціонованого" доступу до чутливої інформації [1, 4]. Встановлені дії групуються у межах етапів життєвого циклу атаки соціальної інженерії. Назва кожного з них формулюється відповідно до очікуваних результатів. Попри це, в літературі відсутня єдина модель життєвого циклу атаки соціальної інженерії. Серед відомих виокремлюються, наприклад: розслідування (англ. investigation), упіймання (англ. hook), грання (англ. play), виходження (англ. exit) [5]; приманка (англ. bait), гачок (англ. hook), атака (англ. attack), втеча (англ. escape) [6]; дослідження і підготовлення (англ. interact and build trust), взаємодіяння і встановлювання довіри (англ. interact and build trust), використання (англ. exploit), очищення (англ. clear tracks) [7]. Незважаючи на таку різноманітність прикладів, усі вони характеризуються еволюціонування атаки соціальної інженерії від задуму до завершування.

Рисунок 1. – Приклад представлення життєвого циклу атаки соціальної інженерії [3]

Відповідно до рис. 1, однією з першочергових дій у межах першого етапу життєвого циклу атаки соціальної інженерії є розвідування інформації про “потенційну жертву”. Його результативністю визначається досягненість кінцевого результату. На основі зібраної інформації реалізується другий етап – контактування з “потенційною жертвою” і отримання знань для наступних дій. Зокрема, по-третє, використання отриманого контакту для “санкціонованого” доступу до чутливої інформації. Четвертий, заключний, етап орієнтований на природнє припинення взаємодії без привертання зайвої уваги. Тому потенційна жертва може навіть не здогадуватися про порушення насамперед властивості конфіденційності. В такий спосіб завершується життєвий цикл атаки соціальної інженерії [2–4].

Отже, життєвим циклом визначається еволюціонування атаки соціальної інженерії від задуму до завершення. Дії у його межах групуються в етапи та загалом орієнтовані на отримання “санкціонованого” доступу до чутливої інформації. Проте нині відсутня єдина модель життєвого циклу атаки соціальної інженерії. Попри це усі вони зводяться до того, що після обрання “потенційної жертви” отримується необхідна інформація для виконання дій. Тоді як її обсягом обумовлюється результативність атаки соціальної інженерії. У даному випадку одним із найбільш дієвих способів виконання такого завдання є розвідування інформації з відкритих джерел.

1. ISO/IEC/IEEE 15288:2023. Systems and software engineering. System life cycle processes. [Valid from 2018-05-16]. URL: https://www.iso.org/standard/81702.html (accessed on: 01.11.2025).
2. Мохор В. В., Цуркан О. В., Герасимов Р. П., Яшенков В. П. Вектор соціоінженерної атаки об’єктів критичної інформаційної інфраструктури галузі енергетики. *Кібербезпека енергетики* : матеріали науково-практичної конференції Інституту проблем моделювання в енергетиці ім. Г.Є. Пухова Національної академії наук України (Київ, 28 травня 2025 р.). Київ : ІПМЕ ім. Г. Є. Пухова НАН України, 2025. С. 86.
3. Tutorial : The Four Phases of Social Engineering. URL: https://www.rangeforce.com/ blog/four-phases-of-social-engineering (accessed on: 01.11.2025).
4. Мохор В. В., Цуркан О. В., Герасимов Р. П., Яшенков В. П., Клименко Т. М. Поверхня атаки соціальної інженерії. *Безпека енергетики в епоху цифрової трансформації* : матеріали VI науково-практична конференція Інституту проблем моделювання в енергетиці ім. Г.Є. Пухова Національної академії наук України (Київ, 13 грудня 2024 р.). Київ : ІПМЕ ім. Г. Є. Пухова НАН України, 2024. С. 178, 179.
5. The Human Firewall: Combating Social Engineering Attacks / Cyber Security. URL: https://www.techbrain.com.au/ combating-social-engineering-attacks/ (accessed on: 01.11.2025).
6. Protecting your organization against social engineering. URL: https://www.cyber.gc.ca/ sites/default/files/itsap00166-social-engineering-piratage-psychologique.pdf (accessed on: 01.11.2025).
7. Heuss A. Social Engineering : What It Is & How to Prevent It. 2023. URL: https://www.tenfold-security.com/en/social-engineering/ (accessed on: 01.11.2025).

О.В. Матухно, В.В. Станиціна, В.О. Артемчук

ПОДОЛАННЯ МЕТОДОЛОГІЧНИХ РОЗБІЖНОСТЕЙ У ОЦІНЮВАННІ КЛІМАТИЧНОЇ ПОЛІТИКИ ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ ЕНЕРГЕТИЧНОЇ БЕЗПЕКИ

Сучасний розвиток енергетики відбувається в умовах глибокої взаємозалежності між технологічним прогресом, економічною стабільністю та екологічними викликами. Енергетична безпека сучасних держав значною мірою залежить від ефективності їхньої кліматичної політики, оскільки саме вона визначає траєкторію трансформації енергетичного сектора – найбільшого джерела викидів парникових газів. Однак оцінювання цієї ефективності на практиці ускладнюється через існування низки міжнародних індексів, які часто дають суперечливі результати через різні методологічні підходи.

Проведено дослідження чотирьох ключових індексів – CCPI (Climate Change Performance Index) [1], CAT (Climate Action Tracker) [2], CLIMI (Climate Laws, Institutions and Measures Index) [3] та CPMI (Climate Policy Measures Index) [4] – виявило значну кореляційну залежність (коефіцієнти 0,82-0,87) між першими трьома, що підтверджує їхню здатність комплексно оцінювати зусилля країн у сфері викидів, цілей, політик та інституційних рамок. Водночас, CPMI, який зосереджений виключно на інструментах ціноутворення на вуглець, демонструє слабкий зв'язок з CCPI (0,08), що яскраво ілюструє випадок Мексики: висока оцінка за комплексним індексом (64,6) контрастує з найнижчою оцінкою за індексом ціноутворення (-1,05).

Ці розбіжності безпосередньо впливають на управління енергетичною безпекою, оскільки спотворюють уявлення про реальну ефективність політик.

SWOT-аналіз виявив спільні для всіх індексів виклики: недостатню якість та доступність даних, суб'єктивність методологічних виборів (зокрема, вагування індикаторів) та проблеми з порівнянністю через різні системи оцінювання. Для формування адекватної стратегії енергетичної безпеки необхідно подолати ці методологічні розриви.

В якості шляху вирішення цієї проблеми запропоновано комплексний набір з понад 25 індикаторів, об'єднаних у кількісні та якісні групи. Для енергетичної безпеки найважливішими є:

– Кількісні індикатори: рівень та динаміка викидів парникових газів, частка відновлюваної енергії в енергобалансі, показники енергоефективності економіки, рівень цін на вуглець та обсяги кліматичного фінансування.

– Якісні індикатори: комплексність та якість кліматичного законодавства, міцність інституцій, відповідальних за реалізацію політики, якість кліматичних планів дій, рівень міжнародної кооперації та залучення громадськості.

Інтеграція цих різнопланових показників у єдину рамку оцінки дозволить отримати об'єктивну та збалансовану картину, необхідну для прийняття обґрунтованих управлінських рішень. Подолання методологічних розбіжностей між індексами є ключовим кроком для формування стійкої енергетичної безпеки, оскільки забезпечує прозоре та надійне моніторингове середовище для оцінки прогресу декарбонізації та її впливу на стабільність енергопостачання.

Таким чином, запропонований підхід створює основу для більш реалістичного планування енергетичного переходу з урахуванням національних особливостей. Майбутнє впровадження та тестування цієї рамки для оцінки кліматичної політики України та країн ЄС стане практичним кроком у напрямку підвищення їхньої енергетичної стійкості в довгостроковій перспективі.

1. Climate Change Performance Index (CCPI) (2023). How to Measure Countries' Climate Performance. CCPI Blog (27 February 2023). URL: https://ccpi.org/how-to-measure-countries-climate-performance/.
2. Climate Action Tracker (CAT) (2024). CAT rating methodology. URL: https://climateactiontracker.org/methodology/cat-rating-methodology.
3. European Bank for Reconstruction and Development (EBRD) (2022). Special report on climate change: The low carbon transition. URL: https://www.ebrd.com/content/dam/ebrd_dxp/assets/pdfs/office-of-the-chief-economist/special-reports/energy-security/the-low-carbon-transition/Special-Report-on-Climate-Change-The-Low-Carbon-Transition.pdf.
4. Dieler, J. (2016). Effectiveness of Climate Policies: Empirical Methods and Evidence, Vol. 68. (Munich: ifo Institute). URL: https://www.ifo.de/DocDL/ifo_Beitraege_z_Wifo_68.pdf.

Д.С. Матушкін

ЦИФРОВО КЕРОВАНІ ГІБРИДНІ ЕНЕРГОСИСТЕМИ ЯК ФУНДАМЕНТ ЕНЕРГЕТИЧНОЇ БЕЗПЕКИ В ЕПОХУ ЦИФРОВОЇ ТРАНСФОРМАЦІЇ

Умови сьогодення – це одночасне зростання частки відновлюваних джерел енергії (ВДЕ), ускладнення архітектури енергосистем і прискорена цифрова трансформація. Для критичної інфраструктури це означає, що питання енергетичної безпеки вже не зводиться лише до наявності резервних потужностей. Важливими стають стійкість до коливань генерації, керованість у реальному часі, здатність системи працювати автономно в умовах пошкоджень мережі чи кібератак, а також можливість пріоритизації живлення критичних споживачів. У цьому контексті гібридні енергосистеми (ГЕ) з цифровою системою енергоменеджменту (СЕМ) формують нову парадигму безпеки енергопостачання.

ГЕ поєднує різнорідні джерела – фотоелектричні станції, вітрові установки, дизельні або газові генератори, системи накопичування енергії та мережеве живлення – в єдину керовану архітектуру. Така інтеграція дає можливість збалансувати варіативні джерела з прогнозованими, поєднати низьку маржинальну вартість відновлюваної генерації з гарантованою потужністю традиційних установок, а також створити резервні контури живлення для критично важливих навантажень. Комплексна схема потоків енергії та керування (рис. 1), що описує ці взаємозв'язки, є базовим «каркасом» для забезпечення стійкості та безперервності електропостачання в нормальних, пікових та аварійних режимах роботи.

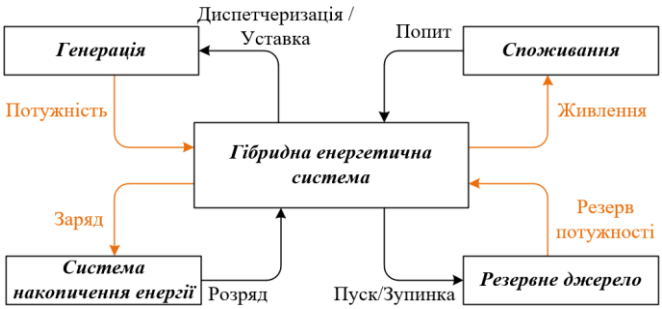


Рисунок 1. – Схема енергетичних потоків і керування гібридної енергосистеми

Принцип модульності означає, що кожен елемент – PV-модулі, вітрогенератори, акумуляторні батареї (АБ), інвертори, дизель-генератори, комунікаційні й вимірювальні модулі – розглядається як незалежний, але

інтегрований блок. Такий підхід безпосередньо посилює безпеку: систему можна масштабувати без зупинки роботи, виводити окремі вузли в ремонт, замінювати застарілі технології на нові без повного демонтажу інфраструктури. У контексті цифрової трансформації це дозволяє поетапно впроваджувати нові алгоритми керування, автономні контролери, IoT-сенсори, модулі кіберзахисту, не створюючи «єдину точку відмови» на рівні апаратури.

Для зменшення паливної залежності та вразливості до логістичних ризиків ключовим принципом стає пріоритетне використання ВДЕ. Енергія, вироблена ФЕС та ВЕС, у першу чергу подається на поточне навантаження, а надлишок спрямовується в системи накопичення. АБ виконують функцію енергетичного буфера – згладжують добові та погодні коливання, забезпечують практично мілісекундну реакцію на стрибки навантаження та виступають короткочасним резервом під час перемикання між джерелами. Правильний добір ємності, C-rate, стратегії заряд-розряд і температурного режиму безпосередньо впливає не лише на ресурс АБ, а й на здатність системи витримувати позаштатні ситуації без втрати живлення критичних споживачів.

Сучасні інвертори перетворюються з простих DC-AC перетворювачів на повноцінні елементи керування енергосистемою. Вони синхронізуються з мережею або формують власну «віртуальну машину», підтримуючи частоту та напругу у мікромережі, здійснюють двосторонній обмін енергією з накопичувачами, реалізують функції обмеження потужності, чорний пуск, захист від небезпечних режимів. У цифровій архітектурі ГЕ інвертор є точкою, де сходяться вимоги якості електроенергії, безпеки обладнання і логіки пріоритетів споживання. Від його надійності, стійкості ПЗ та захищеності інтерфейсів залежить, наскільки вразливою буде система як до апаратних, так і програмних збоїв.

Центральна СЕМ збирає телеметрію з генераторів, АБ, інверторів, вимірювальних модулів і комунікаційних вузлів, будує прогнози генерації та навантаження, приймає рішення щодо запуску резервних потужностей, обмеження некритичних споживачів, профілю заряджання АБ. У цифровій енергетиці саме СЕМ стає ключовою ланкою, що поєднує суто технічну стійкість із інформаційною безпекою. З одного боку, впровадження прогнозування, машинного навчання, оптимізаційних алгоритмів дає змогу знизити ризики дефіциту або профіциту енергії. З іншого боку, зростає значення кіберзахисту, резервування серверів, відмовостійких каналів зв’язку та чітко прописаних сценаріїв дій у разі втрати частини телеметрії або компрометації вузла керування.

Важливим аспектом енергетичної безпеки є не лише наявність резервів, а й логіка їх використання. Система повинна мати заздалегідь визначені режими: нормальна робота з пріоритетом ВДЕ та АБ; нічний режим з живленням від накопичувачів або дизель-генератора; режим пікових навантажень із залученням усіх доступних джерел; аварійний режим, коли

живляться лише критичні споживачі. Сценарне управління дозволяє формалізувати відповіді на запитання: що вимикається першим, що живиться до останнього, в який момент допускається запуск дорогого резерву на паливі. Це безпосередньо пов'язано з цифровою трансформацією, оскільки реалізується в алгоритмах СЕМ, налаштуваннях контролерів і профілях навантаження в системах диспетчеризації.

Для роботи цифрово керованої ГЕ потрібна розгалужена мережа обміну даними: дротові інтерфейси типу Modbus, CAN, Ethernet, а також бездротові технології для віддалених об’єктів. Вони забезпечують збір телеметрії, дистанційне керування, оновлення програмного забезпечення, діагностику. Проте саме цей шар стає джерелом нових ризиків: кібератаки, перехоплення команд, навмисне чи випадкове блокування каналів зв’язку. Тому вимоги до енергетичної безпеки тепер включають шифрування трафіку, аутентифікацію пристроїв, сегментацію мереж, наявність резервних каналів (наприклад, дублювання критичних сигналів по різних фізичних середовищах) і локальних режимів роботи «островом» у разі втрати зв’язку з центральним сервером.

ГЕ, побудовані на принципах модульності, пріоритету ВДЕ, розумної інтеграції накопичувачів, інверторів і дизельних резервів, створюють технічний фундамент енергетичної безпеки. Цифрова трансформація – впровадження СЕМ, прогнозних моделей, комунікаційних протоколів, диспетчеризації – переводить цю стійкість на новий рівень, але водночас робить систему чутливішою до інформаційних ризиків. Тому завданням сучасної енергетичної інженерії стає не лише розробка оптимальної структури гібридної системи, а й проєктування її як кіберфізичної інфраструктури з повним циклом: від фізичних потоків енергії до цифрових контурів керування та захисту.

У підсумку, **енергетична безпека в епоху цифрової трансформації** перестає бути лише питанням встановлення «додаткового дизеля» чи збільшення частки ВДЕ. Вона вимагає інтегрованого підходу, де гібридна енергосистема розглядається як єдиний комплекс генерації, накопичення, резервування, комунікацій та інтелектуального керування. Саме поєднання модульної архітектури, продуманої ієрархії сценаріїв, пріоритизації критичних навантажень і надійної цифрової інфраструктури створює реальні передумови для стійкої, автономної та безпечної роботи енергосистем у кризових умовах і в нормальному режимі. Такі підходи можуть стати базою для модернізації енергетики критичної інфраструктури, промислових об'єктів і локальних мікромереж, особливо в країнах, де питання безпеки електропостачання є стратегічним.

ЗМІСТ

МАТЕРІАЛИ
VII НАУКОВО-ПРАКТИЧНОЇ КОНФЕРЕНЦІЇ

«БЕЗПЕКА ЕНЕРГЕТИКИ В ЕПОХУ ЦИФРОВОЇ ТРАНСФОРМАЦІЇ»

20 листопада 2025 року
м. Київ

Інститут проблем моделювання в енергетиці
ім. Г.Є. Пухова Національної академії наук України,
Україна, 03164, Київ, вул. Генерала Наумова, 15,
тел.: +38 044 424 10 63
https://ipme.kiev.ua/, ipme@ipme.kiev.ua