УДК 620.9:697.3

О. П. Остапенко
І. В. Козачук

ПОКАЗНИКИ ЕНЕРГЕТИЧНОЇ БЕЗПЕКИ ПРОМИСЛОВО-ОПАЛЮВАЛЬНИХ КОТЕЛЬНИХ В УКРАЇНІ В УМОВАХ ВОЄННОЇ ЗАГРОЗИ

Вінницький національний технічний університет

Анотація

Розглянуто проблему кількісної оцінки енергетичної безпеки промислово-опалювальних котельних в умовах воєнної загрози. Проаналізовано існуючі підходи до визначення енергетичної безпеки та показано, що вони орієнтовані переважно на національний і галузевий рівні, а на рівні окремого теплогенеруючого об'єкта придатної системи індикаторів немає. Запропоновано систему показників, що охоплює чотири групи: паливну, технічну, організаційно-відновлювальну та інфраструктурну. Для зведення показників до єдиної шкали використано інтегральний індекс енергетичної безпеки котельної з ваговими коефіцієнтами, що визначаються експертним шляхом. Наведено підхід до практичного застосування індексу для ранжування котельних за рівнем уразливості та вибору заходів підвищення стійкості: резервування палива, автономізації, децентралізації та інтеграції альтернативних джерел тепла, зокрема теплонасосних установок.

Ключові слова: енергетична безпека, промислово-опалювальна котельня, воєнна загроза, стійкість, індикатори, інтегральний індекс, резервування, децентралізація.

Abstract

The issue of quantifying the energy security of industrial and heating boiler plants in the context of a military threat is examined. An analysis of existing approaches to defining energy security reveals that they are primarily focused on the national or sectoral levels, with no suitable system of indicators available for individual heat-generating facilities. A system of indicators is proposed, comprising four categories: fuel-related, technical, organizational-recovery, and infrastructure-related. To consolidate these indicators into a unified scale, an integral energy security index for boiler plants is employed, utilizing weighting coefficients determined through expert assessment. An approach is presented for the practical application of this index to rank boiler plants by their level of vulnerability and to select measures for enhancing resilience—such as fuel stockpiling, achieving operational autonomy, decentralization, and integrating alternative heat sources, specifically heat pump systems.

Key words: *energy security, industrial and heating boiler plant, military threat, resilience, indicators, integral index, stockpiling, decentralization*.

Вступ

Повномасштабне вторгнення, що розпочалося у 2022 році, змінило характер загроз для енергетичної інфраструктури України. Якщо раніше під енергетичною безпекою розуміли здебільшого достатність ресурсів, їх економічну доступність і диверсифікацію постачання, то нині на перший план вийшли фізична вразливість об'єктів, швидкість відновлення після пошкоджень і здатність системи працювати в автономному режимі [1-2]. Масовані ракетні та дронові атаки на генеруючі потужності, газовидобувну, газотранспортну й електричну інфраструктуру безпосередньо впливають на роботу систем теплопостачання, оскільки котельні залежать від трьох зовнішніх систем одночасно: постачання палива, електропостачання власних потреб і водопостачання [3].

Промислово-опалювальні котельні мають особливе значення. Вони забезпечують технологічною парою та гарячою водою виробничі процеси підприємств, а часто й опалення прилеглих житлових кварталів. Збій у їх роботі спричиняє подвійні наслідки: зупинку виробництва та загрозу для життєзабезпечення населення в опалювальний сезон. Закон України «Про критичну інфраструктуру» пе-

редбачає категоризацію об’єктів за рівнем критичності та впровадження вимог щодо їх стійкості [4], проте методичні інструменти, які дозволяють кількісно порівнювати стійкість окремих котельних між собою, залишаються недостатньо розробленими.

Значна частина котельного парку України експлуатується понад нормативні терміни, характеризується високою питомою витратою палива та залежністю від природного газу [5]. Енергетична стратегія України до 2050 року визначає підвищення енергоефективності, диверсифікацію джерел і розвиток розподіленої генерації пріоритетними напрямами [6], але для їх реалізації на рівні конкретного підприємства потрібен інструмент оцінювання, що враховує саме воєнні ризики. Цим зумовлена актуальність дослідження.

Мета дослідженння - обґрунтувати систему показників і методичний підхід до комплексної оцінки енергетичної безпеки промислово-опалювальних котельних в умовах воєнної загрози.

Для досягнення мети поставлено такі завдання:

1. проаналізувати існуючі підходи до визначення та вимірювання енергетичної безпеки;
2. виокремити специфічні загрози для промислово-опалювальних котельних у воєнний час;
3. сформувати систему показників та визначити способи їх розрахунку;
4. запропонувати інтегральний індекс і процедуру його нормування та вагування;
5. сформулювати напрями підвищення енергетичної безпеки котельних.

Результати дослідження

Аналіз підходів до оцінювання енергетичної безпеки

У світовій літературі енергетична безпека трактується як багатовимірна категорія. В роботі [7] пропонують розглядати доступність, інфраструктурну надійність, цінову прийнятність, суспільне сприйняття та стійкість до зовнішніх впливів. Дослідники у [8] узагальнили понад сорок визначень і виділили п’ять вимірів: доступність, прийнятність, технологічний розвиток, стійкість до зовнішніх шоків і регулювання. В роботі [9] розрізняють три перспективи: суверенітету, надійності та стійкості, і підкреслюють, що саме стійкість, тобто здатність системи витримувати та швидко відновлюватися після раптових порушень, стає ключовою в умовах кризових загроз. Огляд індексів і вимірів безпеки представлено також у роботі [10], а концептуальне уточнення — у публікації [11].

У більшості цих праць показники сформовані для національного рівня: частка імпорту, індекс концентрації постачальників, запаси палива у країні, енергоємність ВВП. Вони не відображають умов роботи окремого об’єкта, зокрема вразливості до прямого фізичного ураження. Аналітичні матеріали Міжнародного енергетичного агентства щодо України свідчать, що в умовах війни пріоритетними стають захист і відновлення інфраструктури, децентралізація та мобільні резервні потужності [2]. Проте методика вимірювання цих характеристик на рівні котельної не стандартизована.

Специфічні загрози для промислово-опалювальних котельних

У межах дослідження виокремлено чотири групи загроз.

Паливні загрози: переривання газопостачання внаслідок пошкодження газотранспортної системи, обмеження відбору газу, дефіцит альтернативного палива (мазут, вугілля, біомаса), логістичні обмеження доставки.

Електричні загрози: відключення електроенергії, нестабільна якість напруги, що спричиняє зупинку тягодуттьового обладнання, насосів, автоматики та систем водопідготовки. Саме залежність від електропостачання часто є вирішальною, оскільки навіть газова котельна не може працювати без живлення власних потреб.

Фізичні загрози: пряме ураження об’єкта або його частин (димових труб, паливних споруд, трубопроводів), пошкодження внаслідок вибухової хвилі та уламків, пожежі, а також ураження сусідніх об’єктів, що створює вторинні ефекти.

Операційні та інформаційні загрози: дефіцит персоналу, мобілізаційні втрати кваліфікованих кадрів, порушення зв’язку, кібератаки на системи автоматизованого керування.

Система показників енергетичної безпеки котельної

Запропоновано чотири групи показників, кожна з яких відповідає окремому виміру безпеки.

Паливна група (П)

- **Індекс диверсифікації палива** на основі індексу Герфіндаля — Хіршмана:

$$HHI = \Sigma s_i^2, \quad (1)$$

де s_i — частка і-го виду палива в загальному споживанні (від 1/n до 1; чим нижче значення, тим вище диверсифікація).

- **Автономність за паливом**

$$Тпал = Wзап / Вгод, \quad (2)$$

де Wзап — запас альтернативного палива в енергетичних одиницях, Вгод — годинна витрата при навантаженні відповідного режиму (годин, діб).

- **Частка палива, що постачається з єдиного джерела або по єдиному маршруту**, як індикатор концентрації ризику.

Технічна група (Т)

- **Коефіцієнт резервування потужності**

- $Крез = (Nвст − Nмакс) / Nмакс, \quad (3)$

де Nвст — встановлена потужність, Nмакс — максимальне теплове навантаження.

- **Коефіцієнт технічного стану** — частка обладнання, що перевищило нормативний ресурс.
- **Автономність за електропостачанням** Телек — тривалість роботи на резервному живленні (генератор, ДБЖ, когенерація) з урахуванням запасу палива для нього.
- **Показник модульності** — кількість незалежних генеруючих модулів, що дозволяє зберігати частковий режим при пошкодженні одного з них.

Організаційно-відновлювальна група (О)

- **Час відновлення** Твідн — середній час повернення об’єкта до мінімально необхідного режиму після пошкодження.
- **Забезпеченість аварійним запасом обладнання та запчастин.**
- **Рівень підготовки персоналу** та наявність плану дій у надзвичайних ситуаціях, відпрацьованого на навчаннях.
- **Наявність мобільних резервних джерел** та договорів на їх швидке підключення.

Інфраструктурно-захисна група (З)

- **Розосередженість об’єктів:** відстань між ключовими елементами та наявність на території кількох незалежних котельних модулів.
- **Рівень інженерного захисту:** укриття, захисні конструкції, протиуламкові огородження, дублювання критичних вузлів.
- **Ступінь цифрової захищеності** систем керування.
- **Взаємозамінність підключення:** можливість подачі тепла від сусідніх джерел через перемички теплових мереж.
-

Європейські вимоги та орієнтири для показників

Україна, будучи Договірною стороною Енергетичного Співтовариства, поступово імплементує норми ЄС щодо безпеки постачання: Регламент (ЄС) 2017/1938 про безпеку постачання газу було адаптовано й прийнято в Енергетичному Співтоваристві рішенням Ради міністрів від 30.11.2021 [19], а у квітні 2026 року Уряд схвалив законопроєкт про його впровадження в національне законодавство [21]. Європейські акти адресовані переважно державам і операторам систем, а не окремим котельним, тому вони використані як методичні орієнтири для відбору й порогових значень показників (Таблиця 1).

Таблиця 1 - Європейські вимоги та орієнтири для показників

Акт ЄС	Ключова вимога	Відповідні показники
Регламент (ЄС) 2017/1938 [13]	Оцінка ризиків, превентивний план і план дій на випадок надзвичайної ситуації; стандарт інфраструктури N-1; захист споживачів, зокрема теплопостачальних установок, що обслуговують населення (за рішенням держави)	Коефіцієнт резервування (Т), модульність (Т), індекс диверсифікації (П), наявність плану відновлення (О)
Регламент (ЄС) 2022/1032 [14]	Цільові рівні заповнення газосховищ перед опалювальним сезоном	Автономність за паливом (П), запас альтернативного палива
Директива (ЄС) 2022/2557 (CER) [15]	Оцінка ризиків для критичних суб'єктів, заходи стійкості, повідомлення про інциденти; перехід від захисту до стійкості	Час відновлення (О), інженерний захист і розосередженість (З), навчання персоналу (О)
Директива (ЄС) 2022/2555 (NIS2) [16]	Заходи управління кіберризиками та звітність для суб'єктів енергетичного сектору	Цифрова захищеність систем керування (З)
Регламент (ЄС) 2019/941 [17]	Готовність до ризиків у секторі електроенергії, сценарії криз	Автономність за електропостачанням (Т)
Директива (ЄС) 2023/1791 (енергоефективність) [18]	Вимоги до ефективних систем централізованого теплопостачання, зниження споживання палива	Питома витрата палива (П), частка альтернативних джерел тепла, зокрема теплових насосів

Спільним для європейських актів є перехід від суто «безпеки постачання» до стійкості: здатності системи витримати, адаптуватися й відновитися. Саме тому в запропонованій системі поряд із запасами ресурсів введено показники часу відновлення, автономності та модульності. Регламент (ЄС) 2026/261 щодо поступової відмови від російського газу [20] додатково підтверджує вектор на диверсифікацію палива, що відображено в паливній групі показників.

Інтегральний індекс енергетичної безпеки котельної

Для порівняння показників різної розмірності кожен індикатор x_j нормується до безрозмірної величини $\tilde{x}_j \in [0; 1]$ методом min–max з урахуванням напрямку впливу (для показників, де більше значення гірше, використовується інверсія):

$$\tilde{x}_j = (x_j - x_{j,min}) / (x_{j,max} - x_{j,min}). \quad (4)$$

Інтегральний індекс розраховується як зважена сума:

$$ІЕБ = \Sigma\, w_j \cdot \tilde{x}_j, \text{ де } \Sigma\, w_j = 1. \quad (5)$$

Вагові коефіцієнти w_j пропонується визначати експертним методом: метод аналізу ієрархій Сааті або метод парних порівнянь, залучаючи фахівців з теплоенергетики, цивільного захисту та диспетчерського управління. Для чутливості результату рекомендується виконувати перевірку при зміні вагових коефіцієнтів у діапазоні ±20 %.

Інтерпретація значень індексу має кілька рівнів: високий рівень безпеки (ІЕБ > 0,75), задовільний (0,5–0,75), знижений (0,25–0,5), критичний (< 0,25). Конкретні межі потребують калібрування на вибірці реальних об’єктів і можуть коригуватися залежно від категорії критичності підприємства відповідно до вимог законодавства [4].

Практичне значення індексу полягає в тому, що він дозволяє виявити, яка саме група показників є «вузьким місцем» конкретної котельні, і оцінити ефект заходів: приріст ІЕБ на одиницю витрат є критерієм для ранжування проєктів.

Напрями підвищення енергетичної безпеки

На основі запропонованого підходу визначено такі пріоритетні напрями:

1. **Резервування та диверсифікація палива.** Перехід до двопаливних пальників, створення запасу альтернативного палива, використання місцевої біомаси та відходів виробництва.
2. **Автономізація за електропостачанням.** Встановлення резервних генераторів, систем безперебійного живлення критичних споживачів, мініТЕЦ на базі когенераційних установок, що дозволяє одночасно виробляти тепло й електроенергію [12].
3. **Децентралізація та модульність.** Заміна одного великого джерела кількома модульними агрегатами меншої потужності, що зменшує наслідки ураження окремого блоку.
4. **Інтеграція альтернативних джерел тепла.** Застосування теплонасосних установок з використанням низькопотенційного тепла технологічних процесів та навколишнього середовища зменшує залежність від газу та знижує питомі витрати палива, що узгоджується з пріоритетами енергетичної стратегії [6]. Водночас теплові насоси залежать від електропостачання, тому їх ефективність як елемента стійкості має оцінюватись разом із забезпеченням автономного живлення.
5. **Організаційні та захисні заходи.** Розробка планів відновлення, навчання персоналу, інженерний захист і дублювання систем керування, кіберзахист.

Наукова новизна

1. Вперше для промислово-опалювальних котельних сформовано систему показників енергетичної безпеки, яка поєднує паливні, технічні, організаційно-відновлювальні та захисні характеристики та враховує воєнні загрози, на відміну від існуючих підходів, орієнтованих на національний та галузевий рівні.
2. Удосконалено методику інтегрального оцінювання енергетичної безпеки шляхом введення показників автономності, часу відновлення та модульності як індикаторів стійкості, а не лише достатності ресурсів.
3. Набуло подальшого розвитку застосування експертних методів вагування для порівняння котельних за рівнем вразливості та обґрунтування пріоритетів інвестицій в їх модернізацію.

Практична (науково-технічна) значущість

Запропонований індекс може бути використаний операторами котельних, промисловими підприємствами та органами місцевого самоврядування для: оцінювання відповідності котельних вимогам стійкості критичної інфраструктури; планування резервування й автономізації; порівняння варіантів модернізації (включно з упровадженням когенерації та теплових насосів); підготовки обґрунтувань для залучення фінансування відновлення. Методика є масштабованою: набір показників і вагові коефіцієнти можуть адаптуватися до типу котельні, виду палива та регіональних умов.

Висновки

У воєнний час енергетична безпека котельних визначається не лише наявністю та вартістю палива, а й здатністю об’єкта протистояти ураженню та швидко відновлювати роботу. Запропонована система показників та інтегральний індекс дозволяють кількісно оцінити ці характеристики та визначити пріоритетні заходи підвищення стійкості. Подальші дослідження передбачають калібрування вагових коефіцієнтів на вибірці реальних об’єктів, апробацію методики на конкретних промислових котельнях та оцінювання економічної ефективності заходів із децентралізації й інтеграції теплонасосних установок.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ / REFERENCES

1. Про основи національної безпеки України: Закон України від 19.06.2003 № 964-IV (у чинній редакції). Відомості Верховної Ради України. URL: https://zakon.rada.gov.ua
2. International Energy Agency. Ukraine’s Energy Security and the Coming Winter. Paris: IEA, 2022. URL: https://www.iea.org/reports/ukraines-energy-security-and-the-coming-winter
3. Про теплопостачання: Закон України від 02.06.2005 № 2633-IV (у чинній редакції). URL: https://zakon.rada.gov.ua
4. Про критичну інфраструктуру: Закон України від 16.11.2021 № 1882-IX (у чинній редакції). URL: https://zakon.rada.gov.ua

5. Підготовка до опалювального сезону 2026/2027: стан реалізації планів стійкості регіонів URL: https://mininfra.gov.ua/news/pidhotovka-do-opaliuvalnoho-sezonu-20262027-stan-realizatsii-planiv-stiikosti-rehioniv.
6. Енергетична стратегія України на період до 2050 року: схвалено розпорядженням Кабінету Міністрів України від 21.04.2023 № 373-р. URL: https://zakon.rada.gov.ua
7. Kruyt B., van Vuuren D.P., de Vries H.J.M., Groenenberg H. Indicators for energy security. Energy Policy. 2009. Vol. 37, No. 6. P. 2166–2181.
8. Sovacool B.K., Mukherjee I. Conceptualizing and measuring energy security: A synthesized approach. Energy. 2011. Vol. 36, No. 8. P. 5343–5355.
9. Cherp A., Jewell J. The three perspectives on energy security: intellectual history, disciplinary roots and the potential for integration. Current Opinion in Environmental Sustainability. 2011. Vol. 3, No. 4. P. 202–212.
10. Ang B.W., Choong W.L., Ng T.S. Energy security: Definitions, dimensions and indexes. Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2015. Vol. 42. P. 1077–1093.
11. Winzer C. Conceptualizing energy security. Energy Policy. 2012. Vol. 46. P. 36–48.
12. Про комбіноване виробництво теплової та електричної енергії (когенерацію) і використання скидного енергопотенціалу: Закон України від 05.04.2005 № 2509-IV (у чинній редакції). URL: https://zakon.rada.gov.ua
13. Regulation (EU) 2017/1938 of the European Parliament and of the Council of 25 October 2017 concerning measures to safeguard the security of gas supply. OJ L 280, 28.10.2017. URL: http://data.europa.eu/eli/reg/2017/1938/oj
14. Regulation (EU) 2022/1032 of the European Parliament and of the Council of 29 June 2022 amending Regulations (EU) 2017/1938 and (EC) No 715/2009 with regard to gas storage (Text with EEA relevance). URL: http://data.europa.eu/eli/reg/2022/1032/oj
15. Directive (EU) 2022/2557 of the European Parliament and of the Council of 14 December 2022 on the resilience of critical entities and repealing Council Directive 2008/114/EC (Text with EEA relevance). URL: http://data.europa.eu/eli/dir/2022/2557/oj
16. Directive (EU) 2022/2555 of the European Parliament and of the Council of 14 December 2022 on measures for a high common level of cybersecurity across the Union, amending Regulation (EU) No 910/2014 and Directive (EU) 2018/1972, and repealing Directive (EU) 2016/1148 (NIS 2 Directive) (Text with EEA relevance) Current consolidated version: 27/12/2022 . URL: http://data.europa.eu/eli/dir/2022/2555/oj
17. Regulation (EU) 2019/941 of the European Parliament and of the Council of 5 June 2019 on risk-preparedness in the electricity sector and repealing Directive 2005/89/EC (Text with EEA relevance.) URL: http://data.europa.eu/eli/reg/2019/941/oj
18. Directive (EU) 2023/1791 of the European Parliament and of the Council of 13 September 2023 on energy efficiency and amending Regulation (EU) 2023/955 (recast) (Text with EEA relevance). Current consolidated version: 05/08/2026. .) URL: http://data.europa.eu/eli/dir/2023/1791/oj
19. Energy Community Ministerial Council Decision 2021/15/MC-EnC of 30 November 2021 adapting and implementing Regulation (EU) 2017/1938. URL: https://www.energy-community.org
20. Regulation (EU) 2026/261 of the European Parliament and of the Council of 26 January 2026 on phasing out Russian natural gas imports and preparing the phase-out of Russian oil imports, improving monitoring of potential energy dependencies and amending Regulation (EU) 2017/1938) URL: http://data.europa.eu/eli/reg/2026/261/oj
21. Ukraine strengthens the security of natural gas supply in line with European standards. Ministry of Energy of Ukraine, 02.04.2026. URL: https://mev.gov.ua/en/news/ukraine-strengthens-security-natural-gas-supply-line-european-standards

Ольга Павлівна Остапенко – канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри теплоенергетики, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця, e-mail: ostapenko1208@gmail.com

Іван Віталійович Козачук – студент, факультет будівництва, цивільної та екологічної інженерії, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця

Olga P. Ostapenko – Cand. Sc. (Eng.), Associate Professor, Associate Professor of the Department of Heat Power Engineering, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: ostapenko1208@gmail.com

Ivan V. Kozachuk – Student of the Faculty of the Building, of Civil and Ecological Engineering, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia