

УДК 621.311

**Маліновський А.; Оробчук Б., канд. техн. наук, доц.**

Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, Україна

### **ПІДВИЩЕННЯ ЕНЕРГЕТИЧНОЇ БЕЗПЕКИ ТА СТІЙКОСТІ ГРОМАД МЕТОДАМИ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОГО КЕРУВАННЯ МУНІЦИПАЛЬНОЮ ІНФРАСТРУКТУРОЮ**

***Анотація.** Роботу присвячено шляхам забезпечення енергетичної стійкості громад в умовах дефіциту генеруючих потужностей. Аргументовано доцільність переходу до децентралізованої генерації та муніципальних мікромереж. Обґрунтовано, що комплексні системи інтелектуального енергоменеджменту дозволяють ефективно балансувати навантаження. На прикладі систем адаптивного керування зовнішнім освітленням продемонстровано базові механізми підвищення автономності муніципалітету.*

***Ключові слова:** енергетична стійкість, мікромережі, розумне місто, енергоменеджмент, адаптивне керування інфраструктурою.*

**Malinovskyi A.; Orobchuk B., Ph.D. (Eng.), Assoc. Prof.**

Ternopil Ivan Puluj National Technical University, Ukraine

### **IMPROVING THE ENERGY SECURITY AND RESILIENCE OF COMMUNITIES USING METHODS OF INTELLIGENT MANAGEMENT OF MUNICIPAL INFRASTRUCTURE**

***Abstract.** The paper is devoted to ways of ensuring the energy resilience of communities under capacity deficit. The expediency of transitioning to decentralized generation and municipal microgrids is argued. It is substantiated that complex intelligent energy management systems allow for effective load balancing. Using adaptive control of outdoor lighting as an example, the basic mechanisms for increasing the autonomy of the municipality are demonstrated.*

***Keywords:** energy resilience, microgrids, smart city, energy management, adaptive infrastructure control.*

Вітчизняна енергосистема зазнала масованих руйнувань генеруючих і розподільчих потужностей, що підтверджується звітами Центру досліджень безпеки ЕТН Zürich [1] та Міжнародного енергетичного агентства (ІЕА) [2]. У цих умовах стратегічним пріоритетом стає нівелювання руйнівного соціально-економічного та екологічного впливу війни, що зумовлює перехід від вразливої централізованої моделі до гнучких децентралізованих рішень та розбудови локальної стійкості.

Ефективним шляхом подолання кризи є розгортання муніципальних мікромереж (Microgrids), що поєднують розподілену генерацію (когенерацію, відновлювані джерела енергії (далі ВДЕ)) з місцевими споживачами. Вони забезпечують автономний («острівний») режим під час знеструмлень для безперебійного живлення об'єктів критичної інфраструктури. Цей вектор підтримується і на державному рівні, де стратегія розбудови розумних мереж (Smart Grids) закріплена у Національному плані з енергетики та клімату до 2030 року [3], а Закон України № 3220-IX стимулює впровадження систем накопичення енергії та інституту активних споживачів [4].

Водночас трансформація енергоринку України та зростання частки непрогнозованої генерації з ВДЕ загострюють проблему системних небалансів [5]. Тому критично необхідним є створення механізмів керованого балансування попиту й пропозиції в реальному часі.

На муніципальному рівні інструментом локального балансування є комплексні системи інтелектуального енергоменеджменту Smart City. Вони дозволяють оптимізувати потоки енергії в усіх сферах міського господарства (громадські будівлі, водоканали, системи клімат-контролю), впроваджувати управління попитом (Demand Response) та згладжувати піки споживання (Peak Shaving) [6, 7]. Яскравим та показовим прикладом роботи таких механізмів є оптимізація систем зовнішнього освітлення, які традиційно формують одну з найбільш енергоємних статей муніципального господарства.

Адаптивне (автоматизоване) керування перетворює міську інфраструктуру з пасивного споживача на гнучкий інструмент балансування мережі, мінімізуючи наслідки війни у трьох вимірах. Економічно це дозволяє суттєво знизити енергоспоживання муніципалітетом (наприклад, алгоритмічна зміна рівня освітлення суттєво знижує енерговитрати), вивільняючи кошти для відбудови громади [8]. Екологічно — алгоритмічне зрізання піків споживання зменшує потребу в масовому використанні резервних дизель-них генераторів під час відключень, знижуючи шкідливі викиди [7]. Соціально — система здатна миттєво відключати другорядні навантаження (декоративне освітлення, окремі підсистеми комерційних будівель), перенаправляючи вивільнену потужність на пріоритетне живлення критичної інфраструктури (насосних станцій водоканалів, ліка-рень, укриттів) під час аварій [6].

Додатково комплексне управління інфраструктурою у поєднанні з розподіленою генерацією та мікромережами фундаментально змінює парадигму фізичної безпеки. Замість вразливої централізованої системи створюються автономні «енергетичні острови», що усуває проблему «єдиної точки відмови». Такий підхід кратно підвищує загальну стійкість муніципальної інфраструктури до ракетних ударів, оскільки виведення з ладу одного вузла не призводить до каскадного знеструмлення всього міста, що повністю відповідає рекомендаціям провідних європейських безпекових інституцій [1, 2].

Таблиця 1. Порівняльна характеристика традиційної та інтелектуальної інфраструктури в умовах воєнного стану

Наслідки	Традиційна інфраструктура	Інтелектуальна інфраструктура (Smart City/Microgrids)
Економічні	Високі витрати, збитки від зупинок підприємств	Оптимізація витрат, активне управління попитом (Demand Response)
Екологічні	Масове використання генераторів, викиди	Інтеграція ВДЕ, зрізання піків навантаження
Безпекові та Соціальні	Каскадні знеструмлення (вразливість як "єдина точка відмови")	Створення автономних "островів", безперебійне живлення критичної інфраструктури

Отже, перехід до розподіленої генерації та впровадження систем інтелектуального керування всією муніципальною інфраструктурою є технологічно обґрунтованим підходом до мінімізації наслідків військової агресії. Такі рішення створюють фундамент для енергонезалежних громад, гнучкого балансування мереж та усувають критичну вразливість інфраструктури до масованих атак, гарантуючи стабільне функціонування життєво важливих об'єктів.

### Джерела та література

1. Critical Infrastructure Resilience in Ukraine: Energy, Transportation, and Communication / Center for Security Studies (CSS), ETH Zürich. 2024. URL: [https:// ethz.ch/content/dam/ethz/special-interest/gess/cis/center-for-securities-studies/pdfs/RR-Report-2024-Critical-Infrastructure-Resilience.pdf](https://ethz.ch/content/dam/ethz/special-interest/gess/cis/center-for-securities-studies/pdfs/RR-Report-2024-Critical-Infrastructure-Resilience.pdf) (дата звернення: 30.03.2026).
2. Energy System Resilience: Lessons learned from Ukraine / International Energy Agency (IEA). 2024. P. 25. URL: <https://iea.blob.core.windows.net/assets/2c6f2378-31e8-442a-815a-18e693167915/EnergySystemResilience.pdf> (дата звернення: 30.03.2026).
3. National Energy and Climate Plan of Ukraine 2025-2030 / Ministry of Energy of Ukraine. 2024. URL: <https://mev.gov.ua/> (дата звернення: 31.03.2026).
4. Про внесення змін до деяких законів України щодо відновлення та "зеленої" трансформації енергетичної системи України : Закон України від 30.06.2023 р. № 3220-IX // База даних «Законодавство України» / Верховна Рада України. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/go/3220-20> (дата звернення: 01.04.2026).

5. Буняк О.А., Оробчук Б.Я., Бабюк С.М., Мовчан Л.Т. Ринок електричної енергії: проблеми та перспективи. Науковий журнал «Вісник Хмельницького національного університету». Технічні науки, том 2, №5, 2023. – С. 25-29. ISSN 2307-5732.

6. Pooyamozhi M., Murugesan B., Rajamanickam N., Shorfuzzaman M., Aboelmagd Y. IoT— A Promising Solution to Energy Management in Smart Buildings: A Systematic Review, Applications, Barriers, and Future Scope. Buildings. 2024. Vol. 14, no. 11. P. 3446. URL: <https://doi.org/10.3390/buildings14113446>

7. Silva B. N., Khan M., Han K. Futuristic Sustainable Energy Management in Smart Environments: A Review of Peak Load Shaving and Demand Response Strategies, Challenges, and Opportunities. Sustainability. 2020. Vol. 12, no. 14. P. 5561. URL: <https://doi.org/10.3390/su12145561>

8. Маліновський А. І. Актуальність використання енергозберігаючих методів інтелектуального керування освітленням міста в сучасних умовах // Матеріали XIV МНТКМУС „Актуальні задачі сучасних технологій“, Тернопіль, 11-12 грудня 2025. 2025. С. 407–409.

УДК 621.311.2:004.91

**Станько А., доктор філософії; Дідич І., доктор філософії; Микитишин А., канд. техн. наук, доц.; Блавіцький А.**

Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, Україна

## **СМАРТ-МЕРЕЖІ ТА БЛОКЧЕЙН-РІШЕННЯ ДЛЯ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ СТАБІЛЬНОГО ЕНЕРГОПОСТАЧАННЯ В УМОВАХ НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЙ**

***Анотація.** У роботі проаналізовано впровадження смарт-мереж (smart grid) та блокчейн-рішень для стабільного енергопостачання в умовах надзвичайних ситуацій. Пріділено увагу воєнним конфліктам та техногенним катастрофам, коли централізовані системи енергозабезпечення є вразливими. Смарт-мережі дають змогу оперативно балансувати споживання та генерацію, блокчейн-технології забезпечують прозорий та децентралізований облік енергії і фінансових транзакцій. Розглянуто приклади використання мікромереж, технології Peer-to-Peer для купівлі-продажу електроенергії, а також вплив законодавчих, економічних та кібербезпекових чинників на запровадження цих рішень.*

***Ключові слова:** смарт-мережі, блокчейн, енергопостачання, надзвичайні ситуації, енергетична безпека.*

**Stanko A., Ph.D; Didych I., Ph.D.; Mykytyshyn A., Ph.D., Assoc. Prof.; Blavitskyi A.**

Ternopil Ivan Puluj National Technical University, Ukraine

## **SMART GRIDS AND BLOCKCHAIN SOLUTIONS TO ENSURE STABLE ENERGY SUPPLY IN EMERGENCY SITUATIONS**

***Abstract.** This paper analyses the implementation of smart grids and blockchain solutions to ensure a stable energy supply during emergencies. Attention is paid to military conflicts and man-made disasters, when centralised energy supply systems are vulnerable. Smart grids enable the rapid balancing of consumption and generation, whilst blockchain technologies ensure transparent and decentralised accounting of energy and financial transactions. Examples of the use of microgrids and peer-to-peer technology for the purchase and sale of electricity are examined, as well as the impact of legislative, economic and cybersecurity factors on the implementation of these solutions.*

***Keywords:** smart grids, blockchain, energy supply, emergencies, energy security.*

Сучасні воєнні конфлікти та техногенні катастрофи становлять значну загрозу для стабільного функціонування енергетичних систем [1]. В умовах надзвичайних ситуацій