

I. K. SEZONOVA, A. YU. GUBAR
Харківський національний університет радіоелектроніки

МОДЕЛЬ КІЛЬКІСНОЇ ОЦІНКИ ЗМІН ТА БАЛАНСОВИХ УМОВ ЕНЕРГОЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ПІДПРИЄМСТВА ПРИ НАЯВНОСТІ ДЕКІЛЬКОХ ДЖЕРЕЛ

У статті розглянуто задачу кількісної оцінки змін структури енергозабезпечення підприємства за умов функціонування декількох джерел електроенергії, зокрема централізованого електропостачання, локальної генерації, резервних енергетичних установок та систем накопичення. Актуальність дослідження визначається необхідністю формалізації балансових умов роботи енергетичної системи підприємства в умовах нерівномірного графіка навантаження, обмежень зовнішнього електропостачання, варіативності генерації та потреби у забезпеченні безперервності живлення критичних споживачів.

Запропоновано математичну модель енергетичного балансу підприємства, яка базується на поданні сукупної потужності системи як суми доступних потужностей усіх джерел з урахуванням часової залежності їх роботи. У моделі враховано змінний характер споживання електроенергії, потужнісні обмеження кожного джерела, режими заряду та розряду накопичувачів, коефіцієнти корисної дії, втрати при передачі та резерв потужності для компенсації аварійних і пікових режимів. Балансова умова сформульована у вигляді функціональної залежності між обсягом генерації, накопиченням, зовнішнім надходженням енергії та сумарним попитом підприємства у кожний дискретний момент часу.

На основі моделі визначено кількісні показники оцінки енергетичного стану системи, зокрема рівень покриття навантаження, величину дефіциту або профіциту потужності, частку участі кожного джерела у формуванні балансу, а також коефіцієнт енергетичної стійкості підприємства. Показано, що застосування систем накопичення та алгоритмів керування розподілом навантаження дозволяє зменшити амплітуду дисбалансу, підвищити надійність енергозабезпечення та забезпечити адаптивність системи до змін зовнішніх і внутрішніх режимних параметрів.

Обґрунтовано доцільність використання SCADA-систем, технологій Smart Grid та оптимізаційних алгоритмів для реалізації динамічного керування енергетичними потоками в режимі реального часу. Отримані результати можуть бути використані для побудови систем підтримки прийняття рішень при проєктуванні та експлуатації багатоджерельних систем енергозабезпечення підприємств.

Ключові слова: енергетична система, баланс потужності, Smart Grid, відновлювані джерела енергії, SCADA, накопичувачі енергії, оптимізація.

I. K. SEZONOVA, A. Yu. GUBAR
Kharkiv National University of Radio Electronics

MODEL FOR QUANTITATIVE ASSESSMENT OF CHANGES AND BALANCING CONDITIONS IN AN ENTERPRISE'S ENERGY SUPPLY WHEN MULTIPLE SOURCES ARE AVAILABLE

This article examines the problem of quantitatively assessing changes in an enterprise's energy supply structure under conditions where multiple electricity sources are in operation, including centralized power supply, on-site generation, backup power plants, and energy storage systems. The relevance of the study is determined by the need to formalize the balance conditions of an enterprise's power system under conditions of an uneven load schedule, external power supply constraints, generation variability, and the need to ensure uninterrupted power supply to critical consumers.

A mathematical model of the enterprise's energy balance is proposed, based on representing the total system capacity as the sum of the available capacities of all sources, taking into account the time dependence of their operation. The model accounts for the variable nature of electricity consumption, the power limitations of each source, the charging and discharging modes of storage devices, efficiency coefficients, transmission losses, and power reserves to compensate for emergency and peak conditions. The balance condition is formulated as a functional relationship between generation volume, storage, external energy inflow, and the enterprise's total demand at each discrete point in time.

Based on the model, quantitative indicators for assessing the system's energy status have been determined, including the load coverage level, the magnitude of the power deficit or surplus, the share of each source in achieving balance, and the enterprise's energy stability coefficient.

It has been demonstrated that the use of energy storage systems and load distribution control algorithms makes it possible to reduce the magnitude of imbalance, improve the reliability of power supply, and ensure the system's adaptability to changes in external and internal operating parameters.

The feasibility of using SCADA systems, Smart Grid technologies, and optimization algorithms for implementing real-time dynamic control of energy flows has been substantiated. The results obtained can be used to develop decision support systems for the design and operation of multi-source power supply systems for enterprises.

Keywords: energy system, power balance, Smart Grid, renewable energy, SCADA, energy storage, optimization.

Постановка проблеми

Сучасний розвиток енергетики України характеризується переходом до низьковуглецевої моделі, яка досягається інтеграцією відновлюваних джерел енергії та впровадженням інтелектуальних технологій управління. До 2030 року в Україні очікується суттєве зростання частки відновлюваних джерел енергії, що призводить до зміни структури генерації та ускладнення процесів балансування енергосистеми.

Сучасні умови функціонування промислових і виробничих підприємств характеризуються зростанням вимог до надійності, безперервності та гнучкості енергозабезпечення. Традиційна модель електропостачання, що базується переважно на централізованому надходженні електроенергії із зовнішньої мережі, поступово трансформується у багатокомпонентну систему, в якій одночасно можуть використовуватися декілька джерел живлення: централізована енергосистема, локальна генерація, резервні джерела, відновлювані енергетичні установки та системи накопичення електроенергії. Така структурна зміна зумовлює необхідність перегляду підходів до аналізу, керування та оцінювання режимів роботи енергетичної інфраструктури підприємства.

Особливої актуальності ця проблема набуває в умовах нестабільності зовнішнього електропостачання, наявності графіків обмеження або відключення, нерівномірності навантаження, а також стохастичного характеру генерації з боку відновлюваних джерел енергії. За таких умов забезпечення енергетичного балансу вже не може розглядатися як статичне завдання, а потребує динамічного урахування змін потужності джерел, поточного попиту споживачів, режимів роботи накопичувачів та можливостей оперативного перерозподілу енергетичних потоків.

Незважаючи на значну кількість досліджень у сфері Smart Grid, мікромереж та систем енергоменеджменту, недостатньо опрацьованими залишаються питання побудови універсальної кількісної моделі, яка дозволяла б оцінювати зміни в структурі енергозабезпечення підприємства за наявності декількох джерел і одночасно формалізувати балансові умови їх спільного функціонування. Існуючі підходи часто орієнтовані або на окремі джерела генерації, або на локальні задачі оптимізації, що ускладнює комплексну оцінку стійкості, дефіциту/профіциту потужності та ефективності покриття навантаження в реальних умовах експлуатації.

У зв'язку з цим виникає науково-прикладна задача розроблення математичної моделі кількісної оцінки змін та балансових умов енергозабезпечення підприємства, яка б враховувала багатоджерельну структуру живлення, часову змінність режимів, обмеження потужності, участь систем накопичення енергії та умови взаємодії з зовнішньою енергосистемою. Розв'язання цієї задачі є важливим для підвищення енергетичної стійкості, надійності та адаптивності підприємств в умовах сучасної трансформації енергетичного сектору.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Дослідження у сфері інтелектуальної енергетики свідчать про значний вплив цифровізації на ефективність енергосистем. Зокрема, роботи міжнародних організацій International Energy Agency (IEA) підтверджують, що розвиток децентралізованої генерації та накопичувачів дозволяє підвищити гнучкість системи. Водночас інтеграція до європейської енергомережі ENTSO-E створює нові можливості для балансування, але вимагає дотримання жорстких стандартів стабільності.

Відповідно до Національного енергетичного та кліматичного плану, частка відновлюваних джерел енергії (ВДЕ) у виробництві електроенергії має досягти близько 29 % до 2030 року [1].

Згідно з оцінками ІЕА, досягнення цих показників потребує встановлення: близько 24 ГВт сонячної генерації, 1 ГВт вітрової генерації, 6 ГВт систем накопичення енергії [1].

Таке зростання ВДЕ суттєво змінює баланс енергосистеми, переводячи її від централізованої до децентралізованої моделі з використанням Distributed Energy Resources (DER). Водночас, за оцінками ІЕА, через руйнування інфраструктури втрачено значну частину маневрових потужностей, що призводить до дефіциту генерації до 6 ГВт у пікові періоди [2].

Важливим фактором є також інтеграція України до європейської енергосистеми ENTSO-E, що створює можливість використання імпорту/експорту як інструменту балансування. Синхронізація дозволила стабілізувати частоту та потоки потужності, хоча і призвела до зростання міжсистемних коливань [3].

Крім того, розвиток інтелектуальних мереж (Smart Grid) розглядається як ключовий механізм підвищення ефективності. Впровадження цифрового управління дозволяє:

- зменшити втрати електроенергії;
- підвищити гнучкість системи;
- забезпечити баланс у реальному часі [4].

Таким чином, до 2030 року баланс ЄЕС України визначатиметься трьома основними факторами:

- зростанням частки ВДЕ (до ~30 %),
- розвитком накопичувачів енергії;
- інтелектуалізацією управління енергосистемою.

Для українського контексту особливої ваги набувають дослідження, пов'язані з енергетичною стійкістю підприємств в умовах нестабільності зовнішнього електропостачання, обмежень мережевої інфраструктури та необхідності адаптації до нових режимів роботи енергосистеми. Міжнародні аналітичні матеріали та технічні звіти останніх років підкреслюють, що сучасні енергетичні системи дедалі більше потребують цифровізації, швидкого виявлення нестійких режимів, координації децентралізованих ресурсів і підвищеної гнучкості балансування. Для підприємств це означає потребу переходу від традиційного пасивного споживання до активного енергоменеджменту, в якому багатоджерельне живлення стає не резервною опцією, а базовою архітектурою енергозабезпечення [5].

Разом із тим аналіз наукових публікацій показує, що, незважаючи на значну кількість досліджень у сфері Smart Grid, мікромереж та EMS, недостатньо опрацьованими залишаються питання формалізації кількісної моделі енергетичного балансу саме для підприємства, яке одночасно використовує кілька різнотипних джерел енергії. Більшість існуючих робіт зосереджена або на загальних архітектурах мікромереж, або на окремих алгоритмах оптимізації, тоді як практична задача підприємства вимагає компактної та інтерпретованої моделі, що дозволяє в реальному режимі часу визначати баланс потужності, оцінювати дефіцит/профіцит, враховувати роботу накопичувача та визначати стійкість системи. Саме ця науково-прикладна прогалина й обумовлює доцільність проведення даного дослідження.

Мета дослідження

Метою дослідження є розроблення та наукове обґрунтування математичної моделі кількісної оцінки змін енергетичної структури підприємства і балансових умов її функціонування в умовах використання декількох джерел електроенергії, включаючи централізоване живлення, локальну генерацію, резервні установки та системи накопичення, з подальшим застосуванням моделі для підвищення надійності, стійкості та ефективності енергозабезпечення.

Виклад основного матеріалу дослідження

Енергозабезпечення сучасного підприємства в умовах використання декількох джерел електроенергії слід розглядати як багатокомпонентну динамічну систему, в якій процес формування енергетичного балансу визначається співвідношенням між обсягами генерації, накопичення, зовнішнього енергетичного обміну та поточним навантаженням споживачів.

На відміну від традиційної моделі електропостачання, у якій джерелом живлення виступає лише зовнішня енергосистема, сучасне підприємство може використовувати:

- централізоване електропостачання;
- локальні генеруючі установки;
- резервні дизельні або газові генератори;
- відновлювані джерела енергії;
- системи накопичення електроенергії energy storage system (ESS).

У такій конфігурації виникає необхідність побудови математичної моделі, яка дозволяє кількісно оцінити зміни енергетичної структури підприємства та визначити умови забезпечення балансу потужності в кожний момент часу.

Формалізація структури енергозабезпечення виглядає наступним чином.

Нехай підприємство має n незалежних або частково залежних джерел електроенергії. Тоді сумарна доступна потужність енергосистеми підприємства у момент часу t визначається як:

$$P(t) = \sum_{i=1}^n P_i(t) + P_{ess+}(t) - P_{ess-}(t), \quad (1)$$

де $P(t)$ – сумарна доступна потужність системи енергозабезпечення, кВт; $P_i(t)$ – потужність i -го джерела енергії у момент часу t , кВт; $P_{ess+}(t)$ – потужність розряду ESS, кВт; $P_{ess-}(t)$ – потужність заряду ESS, кВт.

ESS може виступати як додатковим джерелом потужності при розряді, так і споживачем при заряді.

Основною умовою стабільного функціонування енергетичної системи підприємства є забезпечення балансу між сумарною доступною потужністю та поточним навантаженням:

$$P(t) \geq P_L(t) + P_{loss}(t) + P_{res}(t), \quad (2)$$

де $P(t)$ – сумарна доступна потужність системи енергозабезпечення, кВт; $P_L(t)$ – поточне навантаження підприємства, кВт; $P_{loss}(t)$ – технологічні та мережеві втрати потужності, кВт; $P_{res}(t)$ – резерв потужності для забезпечення стійкості системи, кВт.

Якщо умова (2) виконується, енергосистема підприємства функціонує у збалансованому режимі. У випадку невиконання цієї умови виникає дефіцит потужності, який може призвести до обмеження живлення окремих споживачів або переходу системи в аварійний режим.

Для побудови математичної моделі енергетичної системи підприємства важливою є оцінка дефіциту та профіциту потужності електроенергії. Для кількісної оцінки поточного енергетичного стану доцільно використовувати показник енергетичного відхилення:

$$\Delta P(t) \geq P(t) - (P_L(t) + P_{loss}(t) + P_{res}(t)), \quad (3)$$

де $\Delta P(t)$ – балансова різниця потужності, кВт; $P(t)$ – сумарна доступна потужність системи енергозабезпечення, кВт; $P_L(t)$ – поточне навантаження підприємства, кВт; $P_{loss}(t)$ – технологічні та мережеві втрати потужності, кВт; $P_{res}(t)$ – резерв потужності для забезпечення стійкості системи, кВт.

Формула (3) використовується для визначення відхилення або рівноваги балансу енергії в момент часу t . А саме:

- якщо $\Delta P(t) > 0$, у системі спостерігається профіцит потужності;
- якщо $\Delta P(t) = 0$, система перебуває у точці балансу;
- якщо $\Delta P(t) < 0$, у системі має місце дефіцит потужності.

Зазначений показник $\Delta P(t)$ дозволяє в реальному часі оцінювати ступінь енергетичної стійкості підприємства та приймати рішення щодо перемикання джерел або використання накопичувачів.

Оскільки кожне джерело має свій графік доступності, модель повинна враховувати часову змінність потужності. Для цього потужність i -го джерела можна подати як:

$$P_i(t) = P_i^{\max} \cdot k_i(t), \quad (4)$$

де $P_i(t)$ – потужність i -го джерела енергії у момент часу t , кВт; P_i^{\max} – максимальна встановлена потужність i -го джерела, кВт; $k_i(t) \in [0; 1]$ – коефіцієнт доступності або використання потужності джерела в момент часу t .

Для різних джерел коефіцієнт $k_i(t)$ має різну фізичну природу, а саме:

- для зовнішньої мережі він залежить від графіка подачі електроенергії;
- для резервних генераторів – від технічного режиму роботи;
- для сонячних або вітрових станцій – від природних умов;
- для генеруючих установок – від режиму навантаження підприємства.

Таким чином, сумарна потужність електроенергетичної системи підприємства набуває вигляду:

$$P(t) = \sum_{i=1}^n P_i^{\max} \cdot k_i(t) + P_{ess+}(t) - P_{ess-}(t). \quad (5)$$

Для побудови математичної моделі необхідними є показники кількісної оцінки енергозабезпечення. Для оцінювання ефективності функціонування багатоджерельної системи енергозабезпечення підприємства доцільно використовувати такі інтегральні показники як коефіцієнт покриття навантаження, показник (частка) участі окремого джерела в енергобалансі та коефіцієнт енергетичної стійкості.

Коефіцієнт покриття навантаження характеризує рівень забезпечення поточного попиту та описується формулою

$$K_{cov}(t) = \frac{P(t)}{P_L(t)}, \quad (6)$$

де $K_{cov}(t)$ – коефіцієнт покриття навантаження; $P(t)$ – сумарна доступна потужність системи енергозабезпечення, кВт; $P_L(t)$ – поточне навантаження підприємства, кВт.

Якщо $K_{cov}(t)$ більше або дорівнює одиниці - навантаження повністю покривається. В разі, коли $K_{cov}(t)$ менше одиниці - має місце дефіцит енергетичних потужностей.

Частка участі окремого джерела в енергобалансі

$$\alpha_i(t) = \frac{P_i(t)}{P(t)}, \quad (7)$$

де $\alpha_i(t)$ – відносний внесок i -го джерела у сумарне енергозабезпечення.

Цей показник дозволяє оцінити структуру генерації та визначити залежність підприємства від окремих джерел.

Для оцінки надійності системи доцільно ввести коефіцієнт енергетичної стійкості:

$$K_{st}(t) = \frac{P(t) - P_{res}(t)}{P_L(t) + P_{loss}(t)}. \quad (8)$$

Якщо $K_{st}(t) \geq 1$, то система може вважатися стійкою до поточних збурень. При $K_{st}(t) < 1$ енергетичний режим є нестійким або критичним.

Задача керування енергетичними потоками є оптимізаційною задачею. У керуванні багатоджерельною системою енергозабезпечення важливим є не лише забезпечення балансу, але й мінімізація витрат або втрат енергії.

Тому задача може бути сформульована як задача оптимізації:

$$\min F = \sum_{t=1}^T \left(\sum_{i=1}^n C_i P_i(t) + C_{acc} P_{acc}^{dis}(t) + C_{def} \max(0, -\Delta P(t)) \right), \quad (9)$$

де F – цільова функція; C_i – питомі витрати на генерацію електроенергії i -м джерелом; C_{acc} – умовна вартість використання накопичувача; C_{def} – штраф за дефіцит потужності.

Метою є вибір такого режиму роботи джерел, за якого забезпечується енергетичний баланс при мінімальних витратах.

Запропонована модель може бути використана:

- для аналізу стійкості енергозабезпечення підприємства;
- для оцінки наслідків зміни структури джерел енергії;
- для вибору раціонального співвідношення між зовнішнім живленням, локальною генерацією та накопичувачами;
- для реалізації алгоритмів автоматизованого керування в SCADA-системах;
- для підтримки прийняття рішень у Smart Grid-середовищі.

Таким чином, побудована модель дозволяє перейти від описового аналізу енергозабезпечення до формалізованого кількісного оцінювання балансових умов роботи підприємства, що є необхідною передумовою підвищення надійності, гнучкості та енергоефективності виробничих систем.

Для демонстрації практичного застосування запропонованої моделі було розглянуто умовне підприємство, енергозабезпечення якого здійснюється від чотирьох джерел:

- зовнішньої електричної мережі;
- локальної сонячної електростанції;
- резервного дизель-генератора;
- системи накопичення електроенергії.

Для апробації запропонованої математичної моделі сформовано набір вихідних даних, що характеризують режим функціонування енергетичної системи підприємства у певний момент часу. До розрахунку включено параметри зовнішнього електропостачання, локальної генерації, резервного джерела, системи накопичення енергії, поточного навантаження, втрат потужності та резерву. Проведений розрахунок підтвердив працездатність запропонованої математичної моделі та можливість її використання для кількісної оцінки енергетичного стану підприємства.

Для розрахунку використовувались наступні параметри потужностей:

- зовнішня мережа – 300 кВт;
- сонячна станція – 120 кВт;
- дизель-генератор – 80 кВт;
- накопичувач – 100 кВт.

Навантаження підприємства в момент часу складало 420 кВт.

Проведене моделювання показало, що при заданих параметрах сумарна доступна потужність системи енергозабезпечення становить 450 кВт, тоді як сумарна потреба підприємства з урахуванням втрат і резерву дорівнює 440 кВт. Це забезпечує профіцит потужності на рівні 10 кВт, що свідчить про виконання балансової умови та можливість функціонування підприємства у стійкому режимі. Найбільший внесок у покриття навантаження забезпечує зовнішня електрична мережа, частка якої становить 55,6 %, тоді як локальна сонячна генерація, дизель-генератор і накопичувач формують допоміжну структуру енергозабезпечення.

Значення коефіцієнта покриття навантаження $K_{cov}(t) = 1,098$ підтверджує достатній рівень забезпечення поточного попиту, а коефіцієнт енергетичної стійкості $K_{st}(t) = 1,024$ вказує на здатність системи зберігати працездатність за наявності незначних збурень або короткочасних змін навантаження.

Отримані результати можуть бути використані як основа для побудови алгоритмів автоматизованого диспетчерського керування, адаптивного балансування навантаження та прийняття рішень у системах SCADA та Smart Grid.

Висновки

У результаті проведеного дослідження розглянуто проблему кількісної оцінки змін структури енергозабезпечення підприємства в умовах використання декількох джерел електроенергії. Показано, що сучасна енергетична інфраструктура підприємства має розглядатися як багатоджерельна динамічна система, функціонування якої визначається співвідношенням між обсягами генерації, накопичення, зовнішнього електропостачання та поточним графіком навантаження.

У роботі запропоновано математичну модель оцінки балансових умов енергозабезпечення підприємства, яка враховує сумарну доступну потужність джерел, втрати енергії, резерв потужності, режими роботи накопичувачів та часову змінність параметрів енергосистеми. На відміну від спрощених підходів, запропонована модель дозволяє формалізувати умови енергетичного балансу, визначати дефіцит або профіцит потужності, а також оцінювати внесок окремих джерел у загальну структуру покриття навантаження.

У межах дослідження введено систему кількісних показників, зокрема коефіцієнт покриття навантаження, частку участі окремих джерел у формуванні енергетичного балансу та коефіцієнт енергетичної стійкості. Це дозволяє не лише описувати поточний стан енергозабезпечення, але й здійснювати аналітичну оцінку режимів роботи підприємства за різних умов зміни зовнішнього живлення, локальної генерації та навантаження.

Практичне значення одержаних результатів полягає у можливості використання запропонованої моделі в системах енергоменеджменту підприємств, SCADA-комплексах, автоматизованих підсистемах диспетчерського керування та інтелектуальних мережах типу Smart Grid. Розроблений підхід може бути використаний для оптимізації структури джерел живлення, підвищення надійності електропостачання та підтримки прийняття рішень у процесі проектування та експлуатації енергетичної інфраструктури підприємства.

Перспективи подальших досліджень полягають у розширенні моделі шляхом урахування економічних критеріїв оптимізації, тарифних режимів електроспоживання, стохастичних характеристик відновлюваної генерації та інтеграції алгоритмів прогнозування навантаження на основі інтелектуального аналізу даних.

Список використаної літератури

1. Nies S. Innovative Grid Technologies for Ukraine Next Winter and Beyond: Four Challenges – Four Actions. Berlin/Kyiv, 2025. 46 p. URL: <https://greendealukraina.org/assets/images/reports/gdu-technologies-for-ua-grid.pdf> (дата звернення: 17.03.2026).
2. Empowering Ukraine through a Decentralised Electricity System : International Energy Agency. 2024. URL: <https://iea.blob.core.windows.net/assets/b9124406-5b8b-444f-8b20-c4fc22a9221e/EmpoweringUkraineThroughaDecentralisedElectricitySystem.pdf> (дата звернення: 17.03.2026).
3. Böttcher P. C., Gorjão L. R., Beck C., Jumar R., Maass H., Hagenmeyer V., Witthaut D., Schäfer B. Initial analysis of the impact of the Ukrainian power grid synchronization with Continental Europe. *Energy Advances*. 2022. Vol. 2. Issue 1. P. 91–97. DOI: <https://doi.org/10.1039/D2YA00150K>
4. Ukraine strengthens cooperation with the International Energy Agency : Міністерство енергетики України. URL: <https://mev.gov.ua/en/news/ukraine-strengthens-cooperation-international-energy-agency> (дата звернення: 15.03.2026)
5. Сезонова І. К., Губарь А. Ю. Автоматизація управління елементами електроенергетичних мереж як чинник підвищення енергоефективності. *Науковий журнал «Інтернаука»*. 2026. № 2. DOI: <https://doi.org/10.25313/2520-2057-2026-2-11943> (дата звернення: 12.03.2026)

References

1. Nies, S. (2025) Innovative Grid Technologies for Ukraine Next Winter and Beyond: Four Challenges – Four Actions. [Publishing and editing]. Berlin/Kyiv. Retrieved from <https://greendealukraina.org/assets/images/reports/gdu-technologies-for-ua-grid.pdf> [in English].
2. Empowering Ukraine through a decentralised electricity system (2024). [Publishing and editing] International Energy Agency. Retrieved from <https://iea.blob.core.windows.net/assets/b9124406-5b8b-444f-8b20-c4fc22a9221e/EmpoweringUkraineThroughaDecentralisedElectricitySystem.pdf> [in English].
3. Böttcher, P. C., Gorjão, L. R., Beck, C., Jumar, R., Maass, H., Hagenmeyer, V., Witthaut, D., & Schäfer, B. (2023). Initial analysis of the impact of the Ukrainian power grid synchronization with Continental Europe. *Energy Advances*, 2 (1), 91–97. <https://doi.org/10.1039/D2YA00150K> [in English].
4. Ukraine strengthens cooperation with the International Energy Agency. (2025). Ministerstvo Enerhetyky Ukrayiny [Ministry of Energy of Ukraine]. DOI: <https://mev.gov.ua/en/news/ukraine-strengthens-cooperation-international-energy-agency> [in Ukrainian].
5. Sezonova, I. K., & Hubar, A. Yu. (2026). Avtomatyzatsiia upravlinnia elementamy elektroenerhetychnykh merezh yak chynnyk pidvyshchennia enerhoefektyvnosti [Automation of control of elements of electric power networks as a factor in improving energy efficiency]. *Naukovyy zhurnal "Internauka"*, 2. <https://doi.org/10.25313/2520-2057-2026-2-11943> [in Ukrainian].

Сезонова Ірина Костянтинівна – к.т.н., професор кафедри комп'ютерно-інтегрованих технологій, автоматизації, робототехніки та безпекової інженерії Харківського національного університету радіоелектроніки. E-mail: iryna.sezonova@nure.ua, ORCID: 0000-0002-9396-7434.

Губар Артем Юрійович – аспірант кафедри комп'ютерно-інтегрованих технологій, автоматизації, робототехніки та безпекової інженерії Харківського національного університету радіоелектроніки. E-mail: artem.hubar@nure.ua, ORCID: 0009-0002-4574-724X.

Sezonova Iryna Kostiantynivna – Candidate of Technical Sciences, Professor at the Department of Computer-Integrated Technologies, Automation, Robotics, and Safety Engineering of the Kharkiv National University of Radio Electronics. E-mail: iryna.sezonova@nure.ua, ORCID: 0000-0002-9396-7434.

Hubar Artem Yuriiovych – Postgraduate Student at the Department of Computer-Integrated Technologies, Automation, Robotics, and Safety Engineering of the Kharkiv National University of Radio Electronics. E-mail: artem.hubar@nure.ua, ORCID: 0009-0002-4574-724X.

Дата першого надходження статті до видання: 31.03.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 04.05.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 01.07.2026



Стаття поширюється на умовах ліцензії відкритого доступу (CC BY 4.0)