

I.V. ПАНТЕЛЄЄВА, I.C. ВАРШАМОВА

ОЦІНКА РИЗИКІВ ПРИРОДНИХ ТА ТЕХНОГЕННИХ ЗАГРОЗ СТІЙКОСТІ ЕНЕРГЕТИЧНИХ СИСТЕМ НА ОСНОВІ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНИХ ІНФОРМАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ

У статті розглянуто підходи до оцінки ризиків природних і техногенних загроз стійкості енергетичних систем в умовах зростання складності режимів роботи електричних мереж, підвищення вимог до надійності електропостачання та впливу зовнішніх дестабілізуючих факторів. Актуальність дослідження зумовлена зростанням частоти екстремальних природних явищ, зношеністю енергетичного обладнання, інтенсифікацією технологічних процесів, а також переходом до інтелектуальних і цифровізованих енергетичних систем. У межах дослідження проаналізовано основні види природних загроз (екстремальні метеорологічні явища, грозові перенапруги, обледеніння, повені, температурні аномалії) та техногенних загроз (відмови обладнання, короткі замикання, помилки персоналу, порушення алгоритмів керування, збої в системах релейного захисту та автоматики). Показано, що сукупний вплив зазначених факторів може призводити до каскадних відмов, зниження надійності електропостачання та значних економічних збитків. Особливу увагу приділено застосуванню сучасних методів оцінки ризиків, які базуються на використанні інтелектуальних інформаційних технологій, зокрема методів аналізу великих даних, імовірнісного моделювання, нечіткої логіки та елементів машинного навчання. Обґрунтовано доцільність інтеграції даних моніторингу стану обладнання, параметрів режимів роботи мережі та статистики аварійності для формування узагальнених показників ризику. У результаті дослідження сформульовано підходи до класифікації ризиків та визначення пріоритетних напрямів підвищення стійкості енергетичних систем, зокрема за рахунок впровадження адаптивних систем керування, удосконалення схемних рішень. Отримані результати можуть бути використані при проектуванні, модернізації та експлуатації енергетичних об'єктів з метою підвищення їхньої надійності та стійкості до дії природних і техногенних загроз.

Ключові слова: електрична мережа, коротке замикання, стійкість енергетичних систем, природні та техногенні загрози, оцінка ризиків, інтелектуальні інформаційні технології, когнітивне та імовірнісне моделювання.

I.V. PANTIELIEIEVA, I.S. VARSHAMOVA

ASSESSMENT OF RISKS IN NATURAL AND TECHNOGENIC THREATS TO THE STABILITY OF ENERGY SYSTEMS BASED ON INTELLIGENT INFORMATION TECHNOLOGIES

The article examines approaches to assessing the risks of natural and man-made threats to the stability of energy systems in the context of the increasing complexity of operating modes of electrical circuits, which can be advanced to the reliability of electrical supply and inflow external destabilizing factors. The relevance of the study is due to the increasing frequency of extreme natural phenomena, the deterioration of energy supply, the intensification of technological processes, as well as the transition to intelligent and digitalization energy systems. During the research period, the main types of natural threats (extreme weather events, thunderstorm surges, icing, wind, temperature anomalies) and man-made threats (weather conditions, short interruptions, interruptions to personnel, disruption of control algorithms, failures in relay protection and automation systems) were analyzed. It has been shown that the cumulative influx of significant factors can lead to cascading effects, a decrease in the reliability of electricity supply and significant economical surges. Particular attention is paid to the development of current methods for assessing risks, which are based on modern intelligent information technologies, in addition to methods for analyzing big data, global modeling, fuzzy logic and elements of machine learning. The completeness of integration of equipment monitoring data, parameters of robotic modes and emergency statistics for the formation of external risk indicators has been demonstrated. As a result of the research, approaches to the classification of risks and the identification of priority directions for increasing the stability of energy systems, focusing on the development of adaptive energy systems, and improving the circuitry have been formulated. The same results can be obtained during the design, modernization and operation of energy facilities by increasing their reliability and durability to those of natural sources. man-made threats.

Keywords: electrical boundary, short circuit, resilience of energy systems, natural and man-made hazards, risk assessment, intelligent information technologies, cognitive and computer science modeling.

Вступ. Останніми роками за кордоном значної уваги набуває науковий напрям, відомий під терміном «resilience», який українською мовою трактується як «стійкість» або «пружність». В Україні дослідження в цій сфері переважно зосереджені на питаннях технічної стійкості систем. Натомість у країнах Західної Європи даний підхід має значно ширше тлумачення та охоплює не лише технічні аспекти, а й екологічну, психологічну та інші складові стійкості.

З іншого боку, показники, які використовуються для характеристики соціальної стійкості в наукових працях, багато в чому збігаються з тими чинниками, що застосовуються в дослідженнях оцінки якості життя. Водночас під час аналізу стійкості технічних систем доцільно враховувати ризики як природного, так і техногенного походження. У наявних дослідженнях такі загрози переважно розглядалися крізь призму енергетичної безпеки, що буде детальніше обґрунтовано далі.

Зростання частоти природних катаклізмів зумовлює необхідність поглибленого аналізу ризиків їх

виникнення та розроблення системи заходів, спрямованих на мінімізацію негативних наслідків. Особливою актуальності ця проблема набуває з огляду на здатність таких подій ініціювати надзвичайні ситуації, що супроводжуються підвищеною ймовірністю виникнення множинних, у тому числі каскадних, аварій в енергетичному секторі. Енергетика, як складова критичної інфраструктури, відіграє ключову роль у забезпеченні сталого функціонування суспільства та безпосередньо визначає рівень і якість життя населення.

Доцільно враховувати цілі енергетичного переходу, що передбачають масштабне впровадження відновлюваних джерел енергії, а також процеси децентралізації енергосистеми, за яких споживачі електричної енергії набувають функцій виробників. Унаслідок цих трансформацій зазнають змін вимоги до систем електропередачі, оскільки електроенергія передається не лише в традиційному напрямку від виробника до споживача, але й у зворотному напрямку – від споживача до мережі [1,2].

Таким чином, актуальність проекту зумовлена потребою у проведенні комплексного міждисциплінарного дослідження, заснованого на методах системного аналізу, яке охоплює сукупність факторів як природного, так і техногенного походження. Зазначені фактори визначають рівень стійкості енергетичних і соціальних систем, а також їхню спроможність до адаптації та відновлення в умовах існуючих і потенційних загроз. Реалізація такого підходу дозволяє сформувати науково обґрунтовані рішення щодо підвищення надійності функціонування критичної інфраструктури та забезпечення сталого розвитку суспільства в умовах зростання ризиків.

Постановка проблеми. У сучасних умовах функціонування енергетики України проблема техногенних загроз набуває особливої актуальності та системного характеру. Значна зношеність основних фондів електроенергетичної галузі, тривала експлуатація обладнання за межами нормативного ресурсу, недостатні темпи модернізації та впровадження цифрових і автоматизованих технологій істотно підвищують ймовірність відмов і аварій у роботі енергетичних об'єктів. Додатковим чинником ризику є ускладнення режимів роботи енергосистеми, зумовлене інтеграцією відновлюваних джерел енергії, зростанням децентралізованої генерації, що створює нові виклики для надійності, керування та стійкості мережі.

Ситуація ускладнюється дією зовнішніх дестабілізуючих факторів, зокрема пошкодженням енергетичної інфраструктури, обмеженими можливостями оперативного відновлення обладнання та підвищеними вимогами до безперервності електропостачання критично важливих споживачів. У таких умовах техногенні загрози можуть реалізовуватися не лише у вигляді поодиноких аварій, але й призводити до каскадних відмов, масштабних порушень електропостачання та значних соціально-економічних втрат.

Отже, постає науково-практична проблема ідентифікації, оцінювання та управління ризиками техногенних загроз в енергетиці України з урахуванням сучасного технічного стану галузі, трансформаційних процесів в енергосистемі та зростаючої ролі енергетики як критичної інфраструктури. Вирішення цієї проблеми потребує розроблення комплексних методів аналізу ризиків і обґрунтування ефективних заходів, спрямованих на підвищення стійкості та надійності енергосистеми в поточних умовах.

Методологія. Методологія ґрунтується на комплексному та міждисциплінарному підході, що поєднує методи системного аналізу, теорії надійності, аналізу ризиків і сучасні інструменти моделювання енергетичних систем. На першому етапі передбачається ідентифікація техногенних загроз із урахуванням особливостей функціонування об'єктів генерації, передачі та розподілу електричної енергії, а також їх взаємозв'язку з іншими елементами критичної інфраструктури.

Для дослідження наслідків реалізації техногенних загроз використовується імітаційне моделювання режимів роботи енергосистеми в нормальних, аварійних і післяаварійних станах, що дозволяє оцінити

ймовірність каскадних відмов, масштаб порушень електропостачання та чутливість системи до окремих елементів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Проблема природних надзвичайних ситуацій достатньо широко висвітлена у вітчизняних і зарубіжних наукових дослідженнях. Водночас для України ці питання набувають особливої актуальності з огляду на зростання частоти та інтенсивності небезпечних природних явищ, а також їхній вплив на функціонування критичної інфраструктури та безпеку населення. В умовах сучасних викликів особлива увага зосереджується на природних об'єктах, що мають життєво важливе значення для суспільства, зокрема водних ресурсах, лісових масивах, земельних угіддях та природно-кліматичних системах, від стабільного стану яких залежить соціально-економічний розвиток країни [3].

Для України характерним є поєднання природних ризиків із високим рівнем техногенного навантаження на довкілля, що підвищує ймовірність виникнення комплексних надзвичайних ситуацій. Наслідки таких подій можуть проявлятися у вигляді порушень роботи енергетичних, транспортних і комунальних систем, деградації природних екосистем та погіршення умов життєдіяльності населення. У зв'язку з цим зростає потреба у поглибленому науковому аналізі природних надзвичайних ситуацій з урахуванням регіональних особливостей України та розробленні превентивних і адаптаційних заходів, спрямованих на зниження ризиків і мінімізацію можливих втрат.

Природні ризики, зокрема землетруси, штормові явища, повені та періоди екстремально високих температур, у роботі [4] віднесені до ключових чинників, що зумовлюють виникнення каскадних аварій в енергосистемах. Актуальні наукові дані вказують на те, що кліматичні зміни супроводжуються зростанням частоти та інтенсивності екстремальних природних явищ, які здатні ініціювати масштабні порушення функціонування енергетичної інфраструктури та призводити до системних аварій. Згідно з інформацією Організації з безпеки і співробітництва в Європі, протягом останнього десятиліття спостерігається стійка тенденція до збільшення кількості таких аварій, наслідки яких охоплюють дедалі ширші верстви населення у різних країнах світу.

На рис. 1 приведена діаграма ризиків.



Рис. 1. Ризики енергетичній безпеці

Зокрема, протягом останніх восьми років було зафіксовано п'ять масштабних системних погашень електропостачання. У 2019 році аварії в енергосистемах Бразилії та Парагваю призвели до порушення електропостачання для близько 87 млн осіб. У 2018 році в Індії масштабне відключення охопило приблизно 620 млн споживачів. У 2017 році подібна подія в Бангладеш торкнулася близько 150 млн осіб, у 2019 році в Пакистані – близько 140 млн, а у 2018 році в Шрі-Ланці наслідки системної аварії відчули близько 21 млн людей [5, 6].

Значущість окресленої проблематики істотно посилюється в умовах розвитку концепції інтелектуальних енергетичних систем (ІЕС, Smart Grid), реалізація яких передбачає широке впровадження сучасних технологій у сфері генерації, передачі, розподілу, накопичення та споживання електричної енергії. Такі трансформації зумовлюють суттєве ускладнення технологічної підсистеми електроенергетичних систем (ЕЕС) та підвищення вимог до їх керованості й надійності.

Сучасні ЕЕС являють собою складні багатозв'язкові, просторово розподілені ієрархічні системи, функціонування яких відбувається під впливом широкого спектра зовнішніх і внутрішніх збурень як детермінованого, так і стохастичного характеру [7]. За таких умов зростає роль системного аналізу, адаптивних методів управління та оцінювання стійкості енергосистем у процесі їх розвитку та експлуатації.

Дослідження, присвячені оцінюванню ризиків в енергетичному секторі України та інших країн, здебільшого були зосереджені на інвестиційних і економічних ризиках, а також на ризиках, що визначають рівень надійності електропостачання [8, 9-11]. Водночас постановка наукових завдань, орієнтованих на комплексну оцінку ризиків, зумовлених природними надзвичайними ситуаціями та їхнім впливом на функціонування енергосистем, у зазначених роботах розглядалася обмежено або фрагментарно.

Мета дослідження: комплексне оцінювання ризиків природних і техногенних загроз для енергетичної безпеки України з урахуванням сучасного технічного стану енергетичної інфраструктури, трансформаційних процесів в електроенергетичній системі та впливу зовнішніх дестабілізуючих факторів, а також обґрунтування науково виважених підходів і практичних рекомендацій щодо підвищення стійкості, надійності та адаптивної спроможності енергосистеми в умовах зростання системних ризиків.

Виклад основного матеріалу дослідження. Залучення відновлюваних джерел енергії сприяє зменшенню вразливості до природних загроз. Водночас проблематика їх використання в межах Байкальської природної території, зокрема в центральній екологічній зоні, залишається недостатньо дослідженою. Особливої уваги потребують питання просторового розміщення вітрових та сонячних електроустановок, оскільки їх впровадження може зумовлювати як негативний екологічний вплив, так і соціально-економічні наслідки, пов'язані з вилученням земель у межах особливо охоронюваних територій та скороченням зайнятості місцевого населення.

Оцінювання ризиків природних загроз для зазначених територій раніше не здійснювалося. У зв'язку з цим пропонується адаптація та застосування ризикорієнтованого підходу, розробленого для аналізу ризиків у сфері кібербезпеки. Запропонований підхід передбачає комплексний облік можливих наслідків пошкодження або повного знищення об'єктів шляхом використання якісних показників (складність відновлення, втрата унікального природного середовища, іміджеві втрати тощо) та кількісних параметрів, виражених у вартісному еквіваленті, а також оцінку ймовірності реалізації загроз з урахуванням можливості виникнення каскадних процесів.

Ризик доцільно формалізувати у вигляді множини [12]:

$$R = \{T, V, D\},$$

де T – сукупність загроз (у даному дослідженні – природного характеру), V – уразливості системи, що відображають її схильність до пошкоджень під впливом зовнішніх факторів або дій різної природи, а D – збитки у разі реалізації загроз, які розглядаються як інтегральний показник і включають, зокрема, соціальні втрати, пов'язані зі зниженням якості життя населення.

Загрози описуються через ймовірність настання подій, здатних спричинити критичні стани системи, зокрема шляхом використання умовних ймовірностей та причинно-наслідкових залежностей, що формалізуються у межах байєсівських мереж. Такий підхід дозволяє враховувати невизначеність вихідних даних, взаємозалежність окремих факторів, а також можливість розвитку каскадних процесів за різних сценаріїв впливу природних загроз.

Кількісна оцінка збитків здійснюється у вартісному еквіваленті на основі експертних оцінок із залученням фахівців відповідних галузей. При цьому враховуються прямі економічні втрати, витрати на відновлення об'єктів та інфраструктури, а також непрямі збитки, зумовлені порушенням умов життєдіяльності населення та зниженням соціально-економічних показників. Для підвищення достовірності результатів доцільним є застосування процедур агрегування експертних суджень і аналізу чутливості отриманих оцінок до зміни вихідних параметрів.

Оцінювання ризиків енергетичних об'єктів у разі техногенних аварій ґрунтується на аналізі можливих сценаріїв відмов обладнання, помилок персоналу та зовнішніх впливів, що можуть призвести до порушення нормального режиму роботи або виникнення аварійних ситуацій. Особливу увагу приділяють об'єктам електроенергетичної інфраструктури як елементам критичних систем, від функціонування яких залежить надійність електропостачання, безпека населення та стабільність соціально-економічних процесів.

Методика оцінювання ризиків техногенних аварій передбачає поетапну ідентифікацію небезпечних подій, аналіз їх причин та оцінку наслідків для енергетичного об'єкта і суміжних систем. На першому етапі формується перелік потенційно небезпечних сценаріїв із урахуванням технічного стану обладнання, режимів його експлуатації, рівня автоматизації та надійності систем релейного захисту й автоматики. Далі

здійснюється оцінка ймовірності реалізації кожного сценарію на основі статистичних даних експлуатаційних відмов, результатів діагностики та експертних суджень.

Наслідки техногенних аварій оцінюються з урахуванням масштабів порушення електропостачання, тривалості перерв, обсягів електричної енергії, що недовідпущена, можливих пошкоджень обладнання та впливу на суміжні об'єкти інфраструктури. Особливо розглядаються соціальні та екологічні наслідки, зокрема ризики для безпеки персоналу, населення та навколишнього середовища. Інтегральна оцінка ризику формується шляхом поєднання показників імовірності аварійних подій та величини очікуваних збитків для кожного сценарію.

У межах методики доцільним є використання сценарного аналізу та елементів теорії надійності для виявлення «вузьких місць» енергетичних об'єктів і визначення пріоритетних напрямів підвищення їх стійкості. Отримані результати можуть бути використані для обґрунтування заходів з модернізації обладнання, удосконалення схем електропостачання, підвищення ефективності систем захисту та розроблення планів реагування на аварійні ситуації [13].

На рис. 2 для прикладу приведена узагальнена схема розвитку каскадних аварій у системі.

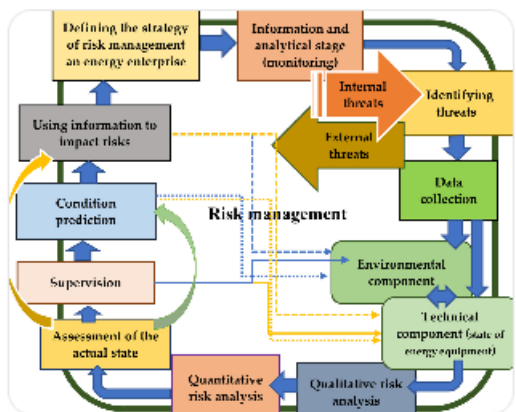


Рис. 2. Схема розвитку каскадних аварій в енергетичних об'єктах

Схема ілюструє послідовне поширення аварійних процесів від первинної відмови окремого елемента до масштабних порушень режимів роботи системи. Початковою ланкою каскадного процесу, як правило, є локальна техногенна подія, зумовлена відмовою обладнання, помилкою персоналу або порушенням режимних параметрів. Унаслідок цього відбувається перерозподіл потоків потужності, перевантаження суміжних елементів та зростання ймовірності їх відмови.

Подальший розвиток аварії характеризується множинними вторинними відключеннями, порушенням селективності роботи релейного захисту та автоматики, а також можливим відокремленням частин енергосистеми з утворенням ізольованих режимів. На завершальному етапі каскадного процесу можливе виникнення масштабних перерв електропостачання,

зниження частоти та напруги, а в критичних випадках – повне знеструмлення окремих регіонів.

Запропонована схема дозволяє наочно відобразити причинно-наслідкові зв'язки між елементами енергетичної системи та використовується в методиці оцінювання ризиків для врахування ймовірності розвитку каскадних аварій, а також для визначення найбільш уразливих вузлів і обґрунтування заходів щодо підвищення стійкості та надійності електроенергетичних об'єктів.

Каскадний ризик зручно формалізувати як ланцюг ймовірнісних переходів між станами системи. Нехай S_0 – нормальний стан, S_1 – первинна відмова елемента e_i , S_2 – перевантаження/порушення режиму в суміжних елементах, S_3 – вторинні відключення та розділення мережі на «острови», S_4 – масштабне порушення електропостачання (blackout). Тоді каскад описується марковською схемою переходів:

$$P(S_{k+1} | S_k) = pk, k = 0, \dots, 3,$$

де p_k залежать від поточного режиму, завантаження елементів і роботи релейного захисту.

Для конкретної реалізації через елементи мережі вводять умовні ймовірності відмов суміжних елементів після події A_i (відмова e_i):

$$P(A_j | A_i) = f(p_j, \Delta U, \Delta f, \text{налаштування РЗА}),$$

$p_j = \frac{I_j}{I_j^{\max}}$ – відносне завантаження елемента після пе-

рерозподілу $\Delta U, \Delta f$ – відхилення напруги та частоти.

Ймовірність розвитку каскаду до критичного стану S_4 для заданого первинного ініціатора A_i може оцінюватися як сума по сценаріях ω (послідовностях відмов):

$$P(S_4 | A_i) = \sum_{\omega \in \Omega_i} \prod_{(m \rightarrow n) \in \omega} P(A_n | A_m),$$

а очікуваний каскадний збиток:

$$E[D | A_i] = \sum_{\omega \in \Omega_i} D(\omega) \prod_{(m \rightarrow n) \in \omega} P(A_n | A_m),$$

де $D(\omega)$ включає, наприклад, недовідпустку електроенергії та тривалість перерв електропостачання для сценарію ω .

Висновки. У межах розглянутого матеріалу показано, що оцінювання ризиків для енергетичних об'єктів доцільно здійснювати на основі формалізованого ризик-орієнтованого підходу, який поєднує ймовірнісну оцінку загроз, аналіз ушкоджень та інтегральне визначення можливих збитків. Запропоноване подання ризику у вигляді множини параметрів дозволяє уніфікувати опис як природних, так і техногенних загроз та забезпечує узгодженість методики для різних типів об'єктів енергетичної інфраструктури.

Обґрунтовано доцільність використання ймовірнісних моделей, зокрема байєсівських мереж і марковських переходів між станами системи, для опису розвитку аварійних процесів. Такий підхід забезпечує врахування невизначеності вихідних даних, взаємозалежності елементів енергосистеми та можливості виникнення каскадних аварій, що є критично важливим для складних розподілених енергетичних мереж.

Формалізований опис каскадних ризиків через умовні ймовірності відмов суміжних елементів

дозволяє кількісно оцінювати імовірність переходу локальних техногенних подій у масштабні порушення електропостачання. Це створює методичну основу для визначення найбільш уразливих вузлів енергетичної системи та пріоритетного впровадження заходів з підвищення її стійкості й надійності.

Отримані результати можуть бути використані при розробленні програм модернізації енергетичних об'єктів, удосконаленні систем релейного захисту й автоматики, а також при формуванні планів запобігання та реагування на аварійні ситуації, що в сукупності сприятиме зниженню ризиків виникнення каскадних аварій і мінімізації їх соціально-економічних наслідків.

Список літератури

1. Cen Nan, Sansavini G., Kroeger W. Building an integrated metric for quantifying the resilience of interdependent infrastructure systems // 9th Intern. Conf. on Critical Information Infrastructure Security. Limassol, Cyprus. October 13-15. 2019, 12 p.
2. Massoud A. Challenges in reliability, security, efficiency, and resilience of energy infrastructure: Toward smart self-healing electric power grid // IEEE PES General Meeting, Pittsburg. USA. July 20-24. 2020. 5 p
3. Sadeghi M., Shalwpour S. Energy risk management and value at risk modeling // Energy Policy. 2021. №34. Pp. 3367 - 3373.
4. Zhonglin Wang, Nistor M.S., Pickl S.W. Analysis of the definitions of resilience // 20th IFAC World Congress. Toulouse. France. July 9-14. 2020. Pp. 11136 - 11144
5. Технічні ризики. Теорія та практикум:[Електронний ресурс]: навчальний посібник для студентів спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» спеціалізації: «Інжиніринг електротехнічних комплексів», «Електромеханічні та мехатронні системи енергоємних виробництв». О. М. Терент'єв, С. В. Зайченко, А. Й. Клешов, Н. А. Шевчук ; КПІ ім. Ігоря Сікорського. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2020. 160 с.
6. PMI Standards Committee, William R. Duncan, Director of Standards. A Guide to the Project Management Body of Knowledge. Newton Square, PA: Project Management Institute, 2019.
7. Azzuni Abdelrahman and Breyer Christian. Definitions and dimensions of energy security: a literature review. WIREs Energy Environ. 2018. URL: <https://doi.org/10.1002/wene.268>
8. Харашішвілі Ю. М. Ідентифікація рівня енергетичної безпеки України з позицій сталого розвитку. Економіка промисловості. 2019. № 4 (88). С. 5-27. Doi: <http://doi.org/10.15407/econindustry2019.04.005>
9. Суходоля О. М. Проблеми визначення сфери регулювання енергетичної безпеки. Стратегічні пріоритети. 2019. № 1. С. 5-17.
10. Звіт з оцінки відповідності (достатності) генеруючих потужностей для покриття прогнозованого попиту на електричну енергію та забезпечення необхідного резерву, затверджений постановою НКРЕКП № 605 від 13.03.2020 р.
11. Кириленко О.В., Жуйков В.Я., Денисюк С.П. Використання динамічної тарифікації для оптимізації техніко-економічних показників Microgrid на локальних ринках електроенергії // Техн. електродинаміка. – 2022. – № 3. – С. 37-48.
12. https://ec.europa.eu/info/strategy/priorities-2019-2024/european-green-deal_en
13. Kyrylenko O., Zhuikov V., Denysiuk S. Use of dynamic tariffication for optimization microgrid technical and economic indicators in local electricity markets // Техн. електродинаміка. – 2022. – № 3. – Pp. 37-48.

References (transliterated)

1. Cen Nan, Sansavini G., Kroeger W. Building an integrated metric for quantifying the resilience of interdependent infrastructure systems. 9th Intern. Conf. on Critical Information Infrastructure Security. Limassol, Cyprus. October 13-15. 2019, 12 p.
2. Massoud A. Challenges in reliability, security, efficiency, and resilience of energy infrastructure: Toward smart self-healing electric power grid. IEEE PES General Meeting, Pittsburg. USA. July 20-24. 2020. 5 p
3. Sadeghi M., Shalwpour S. Energy risk management and value at risk modeling. Energy Policy. 2021. №34. Pp. 3367 - 3373.
4. Zhonglin Wang, Nistor M.S., Pickl S.W. Analysis of the definitions of resilience. 20th IFAC World Congress. Toulouse. France. July 9-14. 2020. Pp. 11136 - 11144
5. Технічні ризики. Теорія та практикум: [Електронний ресурс]: навчальний посібник для студентів спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» спеціалізації: «Інжиніринг електротехнічних комплексів», «Електромеханічні та мехатронні системи енергоємних виробництв». О. М. Терент'єв, С. В. Зайченко, А. Й. Клешов, Н. А. Шевчук ; КПІ ім. Ігоря Сікорського. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2020. 160 p.
6. PMI Standards Committee, William R. Duncan, Director of Standards. A Guide to the Project Management Body of Knowledge. Newton Square, PA: Project Management Institute, 2019.
7. Azzuni Abdelrahman and Breyer Christian. Definitions and dimensions of energy security: a literature review. WIREs Energy Environ. 2018. URL: <https://doi.org/10.1002/wene.268>
8. Kharazishvili Yu. M. Identifikatsiia rivnia enerhetychnoi bezpeky Ukrainy z pozytsii staloho rozvytku. Ekonomika promyslovosti. 2019. No 4 (88). Pp. 5-27. Doi: <http://doi.org/10.15407/econindustry2019.04.005>
9. Sukhodolia O. M. Problemy vyznachennia sfery rehuliuвання enerhetychnoi bezpeky. Stratehichni priorytety. 2019. No 1. Pp. 5-17.
10. Zvit z otsinky vidpovidnosti (достатності) heneruiuychkh potuzhno-steri dlia pokryttia prohnozovanoho popytu na elektrychnu enerhiu ta zabezpechennia neobkhdnoho rezervu, zatverdzhenyi postanovoio NKREKP № 605 vid 13.03.2020.
11. Kyrylenko O.V., Zhuikov V.Ia., Denysiuk S.P. Vykorystannia dynamichnoi taryfikatsii dlia optymizatsii tekhniko-ekonomichnykh pokaznykiv Microgrid na lokalnykh rynkakh elektroenerhii. Tekhn. elektrodynamika. – 2022. – No 3. – Pp. 37-48.
12. https://ec.europa.eu/info/strategy/priorities-2019-2024/european-green-deal_en
13. Kyrylenko O., Zhuikov V., Denysiuk S. Use of dynamic tariffication for optimization microgrid technical and economic indicators in local electricity markets. Tekhn. elektrodynamika. – 2022. – No 3. – Pp. 37-48.

Надійшла (Received) 20.01.2026

Прийнята (Accepted) 05.02.2026

Опублікована (Published) 30.04.2026

Відомості про авторів / About the authors

Пантелєєва Ірина Вікторівна (Pantieleieva Iryna) – кандидат технічних наук, доцент, кафедра електротехніки і електроенергетики, Навчально-науковий інститут «Українська інженерно-педагогічна академія», Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна, м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2960-2358>; e-mail: panteleeva.iura@gmail.com.

Варшамова Ірина Сергіївна (Varshamova Iryna) – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри електричних апаратів, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7411-2302>, e-mail: iryana.varshamova@khp.edu.ua.