

Киристюк Сергій Вікторович

*кандидат економічних наук, старший науковий співробітник
відділу економіки енергетики та клімату,
Державна установа «Інститут економіки та прогнозування
Національної академії наук України»
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7955-1272>*

**ПІДХОДИ ДО ОЦІНЮВАННЯ РЕЗИЛЬЄНТНОСТІ
ЕНЕРГЕТИЧНИХ СИСТЕМ: ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ**

Положення резильєнтного підходу більш якісно враховують зростання загроз різної природи та підвищення вимог до надійності систем критичної інфраструктури. Специфіка різних систем критичної інфраструктури, доступність даних, пошук методів, що найкращим чином враховують положення резильєнтного підходу, обумовлюють різноманітність підходів і методів оцінки резильєнтності. Встановлено, що найбільшого поширення та науковий інтерес для оцінки резильєнтності сфери енергетики представляють якісно-кількісні й детерміновані методи та оптимізаційні моделі. Узагальнено особливості, переваги та обмеження аналізованих методів оцінки резильєнтності енергетичних систем. Виявлено зростаючий інтерес до розробки інтегральних показників в рамках якісно-кількісних методів та інтеграції специфічних, в тому числі комплексних, функцій в оптимізаційні моделі для врахування усіх аспектів формування резильєнтності енергетичних систем згідно з резильєнтним підходом.

Ключові слова: резильєнтність, оцінювання, якісно-кількісні й детерміновані методи, оптимізаційні моделі.

Sergii Kyryziuk

*Ph.D. in Economics, Senior Researcher of the
Department of Economics of Energy and Climate,
State Organization "Institute for Economics and Forecasting of the
National Academy of Sciences of Ukraine"*

**APPROACHES TO RESILIENCE ASSESSMENT OF ENERGY SYSTEMS:
LITERATURE REVIEW**

The resilience approach has been actively developing since the early 2000s as an alternative to risk management due to the growing number of various threats, on one side, and the increase in requirements for the reliability of critical infrastructure, on the other side. The purpose of this investigation is to summarize the existing foreign literature to fill the methodological gap in Ukrainian science on the assessment of infrastructure resilience, in particular, energy and heating. It has been established that of the entire available list of approaches to assessing critical infrastructure resilience, the most widespread and interesting for application in the energy sector are qualitative-quantitative and deterministic methods and optimization models. The investigation revealed a wide range of proposed deterministic methods, based on single or a couple of indicators, to assess system resilience. They are simpler but require precise quantitative data and are less well aligned with the conceptual framework of the resilience approach. The last drawback of deterministic methods is partially or completely eliminated by qualitative-quantitative methods, which makes them more suitable for assessing the resilience of energy systems. Optimization models require a higher quality of the data used, which imposes certain restrictions on indicators for assessing resilience. In optimization models for assessing the resilience of critical infrastructure systems, in particular, energy, economic indicators embedded in the models are often used. However, in most cases, new functions that describe the resilience of the system are integrated into existing models. It has been found that along with this, more complex solutions have become widespread, which propose integrating into models maximization functions that describe not only the economic aspects of resilience, but also technical, environmental and socio-organizational ones. This approach has a number of advantages that characterize the resilience of the system from the standpoint of its life cycle, while covering all key dimensions of resilience (technical, economic, social, organizational).

Keywords: resilience, assessment, quality-quantitative and deterministic methods, optimization models.



Постановка проблеми. В останні два десятиліття змінилась не лише природа потенційних загроз – зріс ризик нових загроз, зокрема, прямої військової агресії й кібератак, а й частота й масштаби давно існуючих – природних несприятливих явищ і катастроф, що викликані глобальною зміною клімату. Паралельно зростають вимоги до надійності систем критичної інфраструктури (електро-, водо-, теплопостачання, інтернет-доступу) як найбільш пріоритетних цілей національної безпеки. У цьому зв'язку стало очевидним, що традиційний підхід ризик-менеджменту, який активно використовувався упродовж другої половини ХХ століття для менеджменту ризику надзвичайних подій, не в повній мірі відповідає викликам часу. З початку 2000-х рр. активно розвивається новий підхід до вивчення надійності систем – резильєнтний підхід [1, 2]. Його широко використовують в природничих науках, психології й соціології, інженерії й економічних науках [3]. З початку 2010-х рр. його застосування активізувалось у сфері критичної інфраструктури. Основними сферами наукового дослідження при цьому є енергетика, теплопостачання і транспортна система, на які припадає понад 2/3 англомовних публікацій [4].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Одне з перших в англомовній науковій літературі визначення резильєнтної системи запропоновано Bruneau M. та ін., де під такою розуміється така система, яка характеризується низькою ймовірністю відмов та втрат, виражених фізичними руйнуваннями, соціальними чи економічними негативними наслідками, й якій потрібно менше часу для відновлення [2]. В загальному визначення резильєнтності системи зводиться до здатності системи протистояти негативній дії, пом'якшити й зменшити негативні наслідки, швидко відновити функціональність й (4) скоригувати й адаптувати її функціонування до дії негативних чинників [1, 4, 5, 6]. У визначенні теоретичних положень резильєнтного підходу наукова спільнота дійшла певного консенсусу. Натомість активний науковий дискурс триває довкола проблеми оцінки резильєнтності: серед п'яти виділених напрямів розробок у сфері резильєнтності інфраструктури понад 50% публікацій припадає на розробки методів оцінювання [7]. Якщо в англомовній літературі доступні узагальнюючі роботи щодо підходів до оцінювання резильєнтності [1, 4, 5, 8], то у вітчизняній науковій площині ця проблематика поки що знаходиться на початковій стадії наукових розробок [3, 9].

Мета статті. У зв'язку з цим, ми маємо на меті розвинути наукові дослідження шляхом узагальнення підходів до оцінювання резильєнтності систем критичної інфраструктури, головним чином акцентуючи увагу на тих з них, які розроблені, апробовані або можуть бути застосовані до сфери енергетики й теплопостачання.

Матеріали і методи. Вирішення поставленої мети здійснювалось шляхом: 1) пошуку за ключовими

словами (resilience, infrastructure, energy, review, assessment) наукових англомовних публікацій узагальнюючого характеру в базах Google Scholar та Web of Science; 2) скринінгу анотацій відібраних публікацій; 3) детального аналізу публікацій, анотації яких максимально відповідають меті даної публікації.

Виклад основного матеріалу дослідження. В цілому, підходи до оцінювання резильєнтності можна поділити на дві групи: якісні (включаючи якісно-кількісні) й кількісні. Перша група підходів включає якісні описові процедури та якісно-кількісні методи, основані переважно на емпіричному досвіді або експертних оцінках резильєнтності на основі індексів. Друга група підходів включає загальні методи оцінок (детерміновані й ймовірнісні методи) й структуровані моделі (оптимізаційні, симуляційні моделі, моделі нечіткої логіки) [5]. З усього доступного переліку підходів оцінювання систем критичної інфраструктури найбільшого поширення й інтересу для застосування щодо сфери енергетики представляють якісно-кількісні й детерміновані методи та оптимізаційні моделі.

Детермінований підхід до оцінки резильєнтності системи. Авторський колектив на чолі з Bruneau, який вперше ґрунтовно виклав концепцію резильєнтного підходу, також запропонував спосіб оцінювання резильєнтності системи на основі детермінованого підходу: резильєнтність розраховується як відхилення параметрів функціонування системи від її нормального планового стану за умов збурення. Відповідно, резильєнтність залежить від рівня втрати продуктивності системи та часу, упродовж якого має місце втрата продуктивності до моменту відновлення системи [2].

В таблиці 1 узагальнено положення основних методичних підходів до кількісного оцінювання резильєнтності критичної інфраструктури згідно детермінованого підходу.

Окремо виділено більш цілісну й узгоджену з положеннями резильєнтного підходу методичку, запропоновану у [10], яка ґрунтується на оцінці енергетичної резильєнтності за допомогою наступних показників: 1) *тривалість порогу міцності / період стійкості* – час від виникнення негативної події до часу досягнення критичного стану системи, що зазнає негативного впливу події; 2) *швидкість провалу системи* – швидкість досягнення критичного порогу міцності системи; 3) *глибина провалу* – мінімальне значення продуктивності системи внаслідок дії негативних факторів; 4) *швидкість відновлення* – період, упродовж якого система повертається до заданого стану продуктивності після відновлення функціонування; 5) *ступінь провалу* – індикатор, який описує негативну швидкодію на систему, представленого як добуток розміру впливу і часу, за який цей вплив відбувається. Хоча отримані на основі розробленої методички оцінки та висновки резильєнтності різ-

Окремі детерміновані підходи оцінювання резильєнтності

Індикатори згідно запропонованих підходів	Сутність індикаторів
(1) Операційна резильєнтність (2) Фізична стійкість	(1) співвідношення різниці продуктивності після відновлення та в момент деградації системи до часу витраченого на відновлення від моменту деградації (2) продуктивність системи в момент деградації системи
(1) Функціональність системи (2) Час відновлення	(1) добуток співвідношень продуктивності після етапів «відновлення-адаптація» до початкового рівня продуктивності та рівня продуктивності в момент провалу до початкового рівня продуктивності (2) час на відновлення
Коефіцієнт енергетичної безпеки	як міра стійкості системи, яка розраховується як експоненціальна сума вартості енергії та втрат енергії, вираженої у незабезпеченому попиті
Індекс залишкової потужності	як міра стійкості системи, яка відображає співвідношення спожитої і максимально можливо виробленої енергії, тобто надлишкова потужність асоціюється з вищою стійкістю системи
Загальні операційні витрати	як міра стійкості, що включає три типи витрат, а саме: загальні витрати упродовж життєвого циклу технології, витрати, пов'язані з втратами, витрати на транспортування
Індекс Шенона-Вівера	використовується в якості міри стійкості, що описує різноманіття джерел постачання енергії в системі
(1) Резильєнтність (2) Чутливість системи	(1) відношення періоду функціональності системи до загального періоду, включаючи періоди збою системи (2) відношення відсотка відключень до відсотка пошкодження системи

Джерело: узагальнено на основі [1, 4, 5, 7, 8]

них систем теплозабезпечення мають і теоретичну, і прикладну цінність, проте залишається відкритим питання економічної складової резильєнтності.

Необхідність врахування багатоаспектності процесу підвищення стійкості енергетичних систем виражається зростанням інтересу щодо розвитку комплексних методик оцінювання на основі якісно-кількісних методів. Використання **якісно-кількісних методів** дозволяє досить ґрунтовно оцінити резильєнтність системи на кожному із етапів, описуючи за допомогою якісних і кількісних індикаторів основні характеристики системи – міцність, гнучкість, відновлюваність та адаптивність. При описі характеристик цільової системи виділяють чотири ключові виміри її резильєнтності: організаційний, технічний, економічний та соціальний. Технічна резильєнтність – характеризує фізичну міцність і стійкість системи до негативного впливу. Організаційна резильєнтність – характеризує здатність стейкхолдерів до організації процесу підготовки системи до можливого виникнення екстремальних явищ й протидії негативному впливу на систему. Організаційний вимір характеризує інституційну спроможність організувати процес підготовки, розгортання та протидії можливим негативним сценаріям при виникненні надзвичайних подій. Разом з технічним організаційний вимір резильєнтності є найважливішим, формуючи основу резильєнтності критичної інфраструктури. Соціальна резильєнтність – характеризує обізнаність й залученість соціуму, соціальну згуртованість та координацію членів соціуму, які є зовнішніми стейкхолдерами по відношенню до системи, а також рівень задоволення соціуму функціонуванням системи. Соціальна

й організаційна резильєнтність охоплюють опис ступеня залученості всіх суб'єктів до процесу формування стійкої системи. Економічна резильєнтність – характеризує, з одного боку, внутрішні та зовнішні фінансово-економічні можливості протидії й адаптації до впливу екстремальних явищ, й з іншого, економічні вигоди, які створює стійка система. Сюди відносяться різного рівня бюджетні кошти, передбачені для ліквідації стихійних явищ, виділення оперативної фінансової підтримки тощо. Також економічна резильєнтність системи визначається інвестиційними можливостями забезпечення інноваційного розвитку системи. Приклад концептуальної рамки оцінювання резильєнтності системи у розрізі вимірів представлено у таблиці 2.

У концепції резильєнтності критичної інфраструктури ідентифікації загроз разом з описом характеристик системи відводиться ключова роль, від яких залежить вразливість системи [12, с. 210]. Саме виникнення загрози є тою ключовою подією, що активує сформовані можливості системи для протидії негативному впливу, настання якого ініціює здібність системи до відновлення та адаптації, що переходить в стадію підготовки до виникнення можливих нових загроз. На кожному з етапів життєвого циклу резильєнтність системи оцінюється з використанням спеціальних індикаторів, приклад наборів яких представлено у таблиці 3.

Поєднання обох вище згаданих вимірів резильєнтності як двовимірна концептуальна рамка (за вимірами й етапами) представляє собою вищу цінність, що дозволяє одночасно ідентифікувати як підсистеми так і етапи, де спостерігається «просі-

Таблиця 2

Набори індикаторів для оцінювання резильєнтності за її вимірами

Виміри	Технічна	Організаційна	Соціальна	Економічна
Індикатори	1. Міцність 2.Періодичні ТО 3.Безпечний дизайн і проектування 4.Збір даних та моніторинг 5.Обладнання для реагування 6.Резерви та запаси 7.Відновлюваність	1.Адаптивність 2.Готовність першої лінії реагування 3.Інституційна підготовка 4.Регуляторна політика реагування 5.Підвищення готовності 6.Розвиток лідерства і соціальної відповідальності	1.Суспільна обізнаність та готовність	1.Фінансові резерви операторів 2.Бюджетні резерви

Джерело: [11]

Таблиця 3

Набори індикаторів для оцінювання резильєнтності за етапами життєвого циклу формування резильєнтності

Етапи	Планування і підготовка	Протидія	Відновлення	Адаптація
Індикатори	1.Ймовірність провалу системи 2.Якість системи 3.Обізнаність та комунікація 4.Докризовий рівень функціональності системи 5.Попередження та планування, заходи пом'якшення впливу 6.Здатність до навчання	1.Рівень провалу системи 2.Міцність 3.Протидія 4.Опірність 5.Реагування 6.Доступність ресурсів 7.Резерви і запаси 8.Сумісність 9.Економічна сталість 10.Післякризова функціональність	1.Післякризова оцінка завданої шкоди 2.Період відновлення 3.Коефіцієнт відновлення 4.Витрати на відновлення	1.Можливості заміщення/ диверсифікації 2.Адаптаційність/ гнучкість 3.Наслідки зменшення доступності

Джерело: [13]

дань» системи у формуванні високого рівня стійкості системи. Одним з вдалих практичних втілень вище описаної концепції для оцінки резильєнтності представлено в дослідженні [14], що ґрунтується на розрахунку інтервальних інтегральних показників для оцінювання резильєнтності енергетичної системи національного рівня (Global Energy Resilience Index, GERI).

З 2010 р. Світова енергетична рада (СЕР) на щорічній основі розраховує World Energy Trilemma Index, який представляє оцінку продуктивності, збалансованості та міцності енергетичних національних систем. Методологічну основу представленого індексу складають три ключові виміри енергетичної системи, включаючи резильєнтність енергетичної системи, яка описується за допомогою трьох індикаторів: 1) диверсифікації виробництва електроенергії; 2) резервних потужностей; 3) стабільності системи та можливостей відновлення [15]. У 2020 р. як відповідь на зростаючі виклики енергетичній безпеці СЕР розробили концепцію динамічної резильєнтності, яка ґрунтується на п'яти основоположних елементах резильєнтної системи: 1) базові резервні можливості; 2) постійне підвищення обізнаності; 3) миттєве реагування; 4) гнучкість та адаптація; 5) відновлення та запобігання. Представлена СЕР концепція динамічної резильєнтності виходить з теоретичних положень й життєвого циклу резильєнтного підходу, проте наразі вона ще не отримала відповідного вираження в якості повноцінної методики.

Незважаючи на переваги інтегральних показників, вони мають певні недоліки, які обмежують їх значимість та можливості практичного застосування, серед яких основні наступні:

- включення в розрахунок великої кількості показників та індикаторів, що ускладнює порівнюваність та послідовність оцінювань;
- збільшена кількість показників, що описують виробничий аспект, й менша увага до якісного оцінювання постачання енергетичних ресурсів;
- поєднання кількісних та якісних показників посилює роль суб'єктивних оцінок, що збільшує невизначеність їх точності.

Оцінка резильєнтності з використанням оптимізаційних моделей. Моделювання здатне подолати деякі з зазначених вище недоліків, проте більшість широко використовуваних моделей (TIMES, MESSAGE, MARKAL та ін.) не містить вбудованого інтегрального показника, який покриватиме всі можливі потенційні загрози енергетичній системі. Разом з тим, в цих моделях використовуються ряд показників, які можуть бути використані для оцінки резильєнтності енергетичної системи. Огляд літератури свідчить, що для цілей оцінки резильєнтності критичної інфраструктури використовуються різні методи моделювання, серед яких найбільшого поширення набули оптимізаційні, стохастичні методи, агентне моделювання та ін. [1, 8]. При цьому одним з найбільш поширених методів оцінки резильєнтності енергетичних систем є саме оптимізаційне моделювання.

В загальному проблема оптимізації резильєнтності системи зводиться до мінімізації економічних затрат, втрат часу на відновлення або втрат продуктивності системи [1]. Так, авторами дослідження [16] використовувався модельний інструментарій OSeMOSYS, в який було імплементовано дві додаткових функції в якості індикаторів реагування енергетичної системи на сценарії її збурення внаслідок впливу негативних факторів та явищ: 1) збільшення вартості виробленої енергії 2) зменшення пропозиції енергії. В дослідженні [17] цільова функція оптимізації резильєнтності зводиться до мінімізації економічних втрат від негативної спрямованої дії на інфраструктуру. У дослідженні [18] оптимізаційна задача представлена двома цільовими функціями: 1) максимізація резильєнтності, яка описує виробничу продуктивність системи після та до негативних подій; 2) при мінімізації загальних витрат, які включають операційні витрати, витрати на відновлення, збитки від простою. При цьому в моделі закладено ряд обмежень, зокрема, часу й доступних ресурсів для відновлення та технічні обмеження функціонування вузлів та мереж системи.

Автори дослідження [19] запропонували власний погляд на проблему оптимізації інтегрованих енергетичних систем з врахуванням досягнення цілей забезпечення їх міцності та резильєнтності шляхом інтеграції в них чотирьох цільових функцій максимізації:

1. Економічних – показники, що характеризують економічну ефективність генерації енергії, окупність інвестицій та ін.

2. Технологічних – два показники, що описують ймовірність дефіциту генерації енергії й загальні втрати енергії.

3. Екологічних – два показники, що характеризують викиди парникових газів та відносні викиди на одиницю енергії.

4. Соціо-організаційних – для оптимізації цілей пропонується використати підхід, розроблений в [20], який передбачає імплементування в модель інтегрального показника, що об'єднує дев'ять індикаторів, які описують соціальні (доступність трудових ресурсів тощо), природо-ресурсні аспекти, особливості власності й організації систем оповіщення про небезпеку тощо. Оскільки інтегральний показник містить як кількісні так і якісні індикатори, то їх фактичні значення нормалізуються за шкалою від 1 до 5. Запропонований авторами підхід має низку переваг, які характеризують резильєнтність системи з позицій її життєвого циклу, охоплюючи при цьому всі ключові виміри резильєнтності (технічний, економічний, соціальний, організаційний). Разом з тим, не

всі етапи життєвого циклу резильєнтності представлені в повній мірі, зокрема, відновленню практично не приділено уваги. Крім того, включення в оптимізаційні функції якісних показників, які залежать від суб'єктивної оцінки, потребує додаткового вивчення з точки зору впливу на процес моделювання. Проте саме комплексність резильєнтності як процесу вимагає складних новаторських підходів до процесу моделювання.

Використання інтегральних показників в оптимізаційних моделях все частіше пропонується в якості ефективного рішення. Так, у дослідженні [21] запропоновано інтегральний показник як цільова функція максимізації резильєнтності енергетичної системи, що розраховується на основі наступних індикаторів: енергетичний баланс; децентралізація енергопостачання; забезпечення енергетичної безпеки; ефективність перетворення енергії; скорочення викидів парникових газів; можливості резервування. Проте методика досить чутлива до зміни вагових коефіцієнтів використовуваних індикаторів для оцінки резильєнтності та до рівня компетенції експертів при оцінці окремих індикаторів.

Висновки. Проведений аналіз підходів до оцінювання резильєнтності систем критичної інфраструктури не претендує на всеосяжне охоплення даної проблематики, а скоріше дозволив окреслити базові напрацювання у зарубіжній науці. Трактують резильєнтності як здатності протистояти дії несприятливих факторів, пом'якшувати їх негативний вплив, оперативно відновлюватися в разі отримання певної шкоди та адаптуватися до можливих загроз визначає сутність основних індикаторів, які пропонують в якості мір для оцінки резильєнтності систем критичної інфраструктури. Основна частина цих індикаторів оперує зміною продуктивності систем, економічними втратами, необхідним часом для відновлення систем до нормального функціонування. Хоча часто пропонується використання окремих індикаторів в якості універсального для оцінки резильєнтності, все ж більшість досліджень вдаються до комплексного застосування декількох індикаторів, які більш якісно здатні виміряти зміну резильєнтності на всіх чотирьох її етапах та за чотирма вимірами резильєнтності. В окремий напрям оцінки резильєнтності систем можна виділити розрахунок інтегральних індикаторів резильєнтності на основі великої кількості показників. Незважаючи на певні недоліки інтегральних індикаторів, вони використовуються при розробці й практичній апробації методик оцінки резильєнтності енергетичних систем на основі як статистичних методів так і шляхом імплементування в розроблені оптимізаційні моделі.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Ahmadi S., Saboohi Y., Vakili A. Frameworks, quantitative indicators, characters, and modeling approaches to analysis of energy system resilience: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2021. Volume 144. 110988. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.110988>

2. Bruneau M., Chang S.E., Eguchi R.T., Lee G.C., O'Rourke T.D., Reinhorn A., Shinozuka M., Tierney K., Wallace W., Winterfeldt D. A. Framework to Quantitatively Assess and Enhance the Science the Seismic Resilience of Communities. *Earthq. Spectra*. 2003. No. 19. P. 733–752. DOI: <https://doi.org/10.1193/1.1623497>
3. Лігоненко Л. О., Андрийчук, В. А. Резильєнтність в економічному контексті: аналіз світових трендів та перспективи наукових досліджень. *Стратегія економічного розвитку України*. 2023. No. 52. С. 16–37. DOI: <https://doi.org/10.33111/sedu.2023.52.016.037>
4. Mottahedi A. et al. The Resilience of Critical Infrastructure Systems: A Systematic Literature Review. *Energies*. 2021. No. 14(6). 1571. DOI: <https://doi.org/10.3390/en14061571>
5. Hosseini S., Barker K., Ramirez-Marquez J. E. A review of definitions and measures of system resilience. *Reliability Engineering and System Safety*. 2016. No. 145. P. 47–61. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.res.2015.08.006>
6. Royce Francis, Behailu Bekera. A metric and frameworks for resilience analysis of engineered and infrastructure systems. *Reliability Engineering & System Safety*. 2014. Volume 121. P. 90–103. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.res.2013.07.004>
7. Liu W., Shan M., Zhang S., Zhao X., Zhai, Z. Resilience in Infrastructure Systems: A Comprehensive Review. *Buildings*. 2022. No. 12(6). 759. DOI: <https://doi.org/10.3390/buildings12060759>
8. Wang J. et al. Literature review on modeling and simulation of energy infrastructures from a resilience perspective. *Reliability Engineering & System Safety*. 2019. Volume 183. P. 360–373. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.res.2018.11.029>
9. Шевченко Н.І., Плахотнюк Р.В. Методичні підходи до оцінювання стійкості функціонування об'єктів критичної інфраструктури в умовах особливого періоду функціонування економіки України. *Електронний науково-практичний журнал «Проблеми сучасних трансформацій». Серія: право, публічне управління та адміністрування*. 2024. No. 14. DOI: <https://doi.org/10.54929/2786-5746-2024-14-02-08>
10. Rehman H., Nik V., Ramesh R., Ala-Juusela M. Quantifying and Rating the Energy Resilience Performance of Buildings Integrated with Renewables in the Nordics under Typical and Extreme Climatic Conditions. *Buildings*. 2024. No. 14(9). 2821. DOI: <https://doi.org/10.3390/buildings14092821>
11. Guo D., Shan M., Owusu E.K. Resilience Assessment Frameworks of Critical Infrastructures: State-of-the-Art Review. *Buildings*. 2021. No. 11. 464. DOI: <https://doi.org/10.3390/buildings11100464>
12. Kozine I., Petrenj B., Trucco P. Resilience capacities assessment for critical infrastructures disruption: the READ framework (part 1). *International Journal of Critical Infrastructures*. 2018. Vol. 14(3). P. 199–220.
13. Rathnayaka B. et al. A unified framework for evaluating the resilience of critical infrastructure: Delphi survey approach. *International Journal of Disaster Risk Reduction*. 2024. Volume 110. 104598. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijdr.2024.104598>
14. Gatto A., Drago C. Measuring and modeling energy resilience. *Ecological Economics*. 2020. Volume 172. 106527. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2019.106527>
15. World energy trilemma 2024: evolving with resilience and justice. WEC. URL: <https://www.worldenergy.org/publications/entry/world-energy-trilemma-report-2024>
16. Martišauskas L., Augutis J., Krikštolaitis R. Methodology for energy security assessment considering energy system resilience to disruptions. *Energy Strategy Reviews*. 2018. pp. 106–118. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.esr.2018.08.007>
17. Cong H. et al. Robust optimization for improving resilience of integrated energy systems with electricity and natural gas infrastructures. *J. Mod. Power Syst. Clean Energy*. 2018. DOI: <https://doi.org/10.1007/s40565-018-0377-5>
18. Almoghathawi Y, Barker K, Albert LA. Resilience-driven restoration model for interdependent infrastructure networks. *Reliab Eng Syst Saf*. May 2019. No. 185. P. 12–23. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.res.2018.12.006>
19. Hammer L., Veith E. M. Hybrid Renewable Energy System Optimization is Lacking Consideration of System Resilience and Robustness: An Overview. *ENERGY 2021: The Eleventh International Conference on Smart Grids, Green Communications and IT Energy-aware Technologies*, URL: https://personales.upv.es/thinkmind/dl/conferences/energy/energy_2021/energy_2021_3_20_30015.pdf (дата звернення: 10.03.2026)
20. Eriksson E.L., Gray E.M. Optimization of renewable hybrid energy systems – A multi-objective approach. *Renewable Energy*. 2019. Vol. 133. P. 971–999. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.10.053>
21. Yazdanie M. Resilient energy system analysis and planning using optimization models. *Energy and Climate Change*. 2023. Volume 4, 100097. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.egycc.2023.100097>

REFERENCES

1. Ahmadi S., Saboohi Y., Vakili A. (2021). Frameworks, quantitative indicators, characters, and modeling approaches to analysis of energy system resilience: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Volume 144, 110988. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.110988>
2. Bruneau M., Chang S.E., Eguchi R.T., Lee G.C., O'Rourke T.D., Reinhorn A., Shinozuka M., Tierney K., Wallace W., Winterfeldt D. A. (2003). Framework to Quantitatively Assess and Enhance the Science the Seismic Resilience of Communities. *Earthq. Spectra*, No. 19, pp. 733–752. DOI: <https://doi.org/10.1193/1.1623497>
3. Ligonenko L., Andriichuk V. (2023). Rezylentnist v ekonomichnomu konteksti: analiz svitovykh trendiv ta perspektyvy naukovykh doslidzhen [Resilience in the economic aspect: analysis of global trends and prospects for research]. *Stratehiia ekonomichnoho rozvytku Ukrainy – Economic Development Strategy of Ukraine*, No. 52, pp. 16–37. DOI: <https://doi.org/10.33111/sedu.2023.52.016.037> (in Ukrainian)
4. Mottahedi A. et al. (2021). The Resilience of Critical Infrastructure Systems: A Systematic Literature Review. *Energies*, No. 14(6), 1571. DOI: <https://doi.org/10.3390/en14061571>
5. Hosseini S., Barker K., Ramirez-Marquez J. E. (2016). A review of definitions and measures of system resilience. *Reliability Engineering and System Safety*, No. 145, pp. 47–61. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.res.2015.08.006>
6. Royce Francis, Behailu Bekera. (2014). A metric and frameworks for resilience analysis of engineered and infrastructure systems. *Reliability Engineering & System Safety*, vol. 121, pp. 90–103. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.res.2013.07.004>

7. Liu W., Shan M., Zhang S., Zhao X., Zhai, Z. (2022). Resilience in Infrastructure Systems: A Comprehensive Review. *Buildings*, No. 12(6), 759. DOI: <https://doi.org/10.3390/buildings12060759>
8. Wang J. et al. (2019). Literature review on modeling and simulation of energy infrastructures from a resilience perspective. *Reliability Engineering & System Safety*, vol. 183, pp. 360–373. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ress.2018.11.029>
9. Shevchenko N., Plakhotniuk R. (2024). Metodichni pidkhody do otsiniuvannya stiikosti funktsionuvannya ob'ektiv krytychnoi infrastruktury v umovakh osoblyvoho periodu funktsionuvannya ekonomiky Ukrainy [Methodological approaches to assessing the resilience of critical infrastructure functioning in the context of Ukraine's special economic period]. *Elektronnyi naukovo-praktychnyi zhurnal "Problemy suchasnykh transformatsii". Seriya: pravo, publichne upravlinnia ta administruvannya – Electronic scientific and practical journal "Problems of modern transformations". Series: law, public management and administration*, No. 14. DOI: <https://doi.org/10.54929/2786-5746-2024-14-02-08> (in Ukrainian)
10. Rehman H., Nik V., Ramesh R., Ala-Juusela M. (2024). Quantifying and Rating the Energy Resilience Performance of Buildings Integrated with Renewables in the Nordics under Typical and Extreme Climatic Conditions. *Buildings*, 14(9), 2821. DOI: <https://doi.org/10.3390/buildings14092821>
11. Guo D., Shan M., Owusu E.K. (2021). Resilience Assessment Frameworks of Critical Infrastructures: State-of-the-Art Review. *Buildings*, 11, 464. DOI: <https://doi.org/10.3390/buildings11100464>
12. Kozine I., Petrenj B., Trucco P. (2018). Resilience capacities assessment for critical infrastructures disruption: the READ framework (part 1). *International Journal of Critical Infrastructures*, vol. 14(3), pp. 199–220.
13. Rathnayaka B. et al. (2024). A unified framework for evaluating the resilience of critical infrastructure: Delphi survey approach. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, vol. 110, 104598. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijdr.2024.104598>
14. Gatto A., Drago C. (2020). Measuring and modeling energy resilience. *Ecological Economics*, vol. 172, 106527. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2019.106527>
15. World energy trilemma 2024: evolving with resilience and justice. *WEC*. Available at: <https://www.worldenergy.org/publications/entry/world-energy-trilemma-report-2024>
16. Martišauskas L., Augutis J., Krikštolaitis R. (2028). Methodology for energy security assessment considering energy system resilience to disruptions. *Energy Strategy Reviews*, pp. 106–118. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.esr.2018.08.007>
17. Cong H. et al. (2018). Robust optimization for improving resilience of integrated energy systems with electricity and natural gas infrastructures. *J. Mod. Power Syst. Clean Energy*. DOI: <https://doi.org/10.1007/s40565-018-0377-5>
18. Almoghathawi Y, Barker K, Albert LA. (2019). Resilience-driven restoration model for interdependent infrastructure networks. *Reliab Eng Syst Saf*, 185, pp. 12–23. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ress.2018.12.006>
19. Hammer L., Veith E. M. (2021). Hybrid Renewable Energy System Optimization is Lacking Consideration of System Resilience and Robustness: An Overview. *ENERGY 2021: The Eleventh International Conference on Smart Grids, Green Communications and IT Energy-aware Technologies*. Available at: https://personales.upv.es/thinkmind/dl/conferences/energy/energy_2021/energy_2021_3_20_30015.pdf (accessed March 10, 2026)
20. Eriksson E.L., Gray E.M. (2019). Optimization of renewable hybrid energy systems – A multi-objective approach. *Renewable Energy*, vol. 133, pp. 971–999. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.10.053>
21. Yazdanie M. (2023). Resilient energy system analysis and planning using optimization models. *Energy and Climate Change*, vol. 4, 100097. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.egycc.2023.100097>

Дата надходження статті: 20.02.2026

Дата прийняття статті: 13.03.2026

Дата публікації статті: 31.03.2026