

Міністерство освіти і науки України
Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна
Навчально-науковий інститут «Українська інженерно-педагогічна академія»
Кафедра електротехніки та електроенергетики

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

магістра

на тему

**ПІДВИЩЕННЯ НАДІЙНОСТІ РОБОТИ ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖ УКРАЇНИ
В УМОВАХ ПОВНОМАСШТАБНОГО ВТОРГНЕННЯ ТА ВЕДЕННЯ ВІЙНИ**

(тема кваліфікаційної роботи)

Виконав: студент 2 маг. курсу, групи ДЕС-24 мг

Спеціальності: 141 Електроенергетика,
електротехніка та електромеханіка

_____/ Денис МАЗІКІН

(підпис)

(ім'я та прізвище)

Керівник _____/ Артем ЧЕРНЮК

(підпис) (ім'я та прізвище)

Рецензент _____/ _____

(підпис) (ім'я та прізвище)

«До захисту допущено»

Завідувач кафедри _____/ Артем ЧЕРНЮК

(підпис)

(ім'я та прізвище)

Секретар ЕК _____/ Ігор КИРИСОВ

(підпис)

(ім'я та прізвище)

Харків – 2025 рік

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІМЕНІ В. Н. КАРАЗІНА**

Навчально-науковий інститут Українська інженерно-педагогічна академія
Кафедра електротехніки та електроенергетики
Спеціальність 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка
Освітньо-професійна програма Електричні станції, мережі та системи

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

(підпис)

к.т.н., доцент Артем ЧЕРНЮК
(науковий ступінь, вчене звання, ім'я, прізвище)

« ____ » _____ 2025 р.

ЗАВДАННЯ

**на кваліфікаційну роботу дипломну роботу
другого (магістерського) рівня вищої освіти**

здобувачці вищої освіти Денису МАЗІКІНУ

1. Тема «Підвищення надійності роботи електричних мереж України в умовах повномасштабного вторгнення та ведення війни»

затверджена наказом по академії № 4801-5/3665 від «06» жовтня 2025 р.

2. Термін здачі закінченої роботи «15» грудня 2025 р.

3. Вихідні дані до роботи/проєкту: Теоретичні та практичні розробки вітчизняних та зарубіжних авторів за темою роботи, періодичні видання

4. Зміст роботи/проєкту (перелік питань, які належить розробити):

ВСТУП; РОЗДІЛ 1. Аналіз стану проблеми забезпечення надійної роботи електричних мереж України; РОЗДІЛ 2. Розробка моделі оцінки стійкості електроенергетичної системи України. РОЗДІЛ 3. Математичне моделювання процесів забезпечення стійкості енергосистеми, ВИСНОВКИ, ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

5. Перелік графічного матеріалу (презентаційний матеріал):

1. Ілюстративні слайди в обсязі необхідному для доповіді

6. Консультант:

Розділ	Консультант	Підпис, дата		Оцінка (бали)
		Завдання видав	Завдання прийняв	

7. Дата видачі завдання «10» жовтня 2025р.

Керівник _____ Артем ЧЕРНЮК
(підпис) (ім'я, прізвище)

Завдання прийняв до виконання _____ Денис МАЗІКІН
(підпис) (ім'я, прізвище)

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН-ГРАФІК
виконання кваліфікаційної дипломної роботи

№ з/п	Назва етапів роботи та питань, які мають бути розроблені відповідно до завдання	Термін виконання	Позначки керівника про виконання завдань
1	Визначення актуальності теми дослідження Проведення аналізу наукової літератури	02.10.25 – 05.10.25	
2	Виконання першого розділу дипломної роботи	06.10.25 – 15.10.25	
3	Виконання другого розділу дипломної роботи	16.10.25 – 29.10.25	
4	Виконання третього розділу дипломної роботи	30.10.25 – 26.11.25	
5	Оформлення пояснювальної записки	27.11.25 – 07.12.25	

Студент (ка) _____ Денис МАЗІКІН
(підпис) (ім'я, прізвище)

Нормоконтроль _____ Юлія ОЛІЙНИК
(підпис) (ім'я, прізвище)

РЕФЕРАТ

Сторінок тексту – 86 ; рисунків – 6; таблиць – 4;
літературних джерел – 98.

У роботі досліджуються транскордонні наслідки масштабних військових атак на критично важливу енергетичну інфраструктуру України та їхні наслідки для енергетичної стійкості Європи. На відміну від попередніх досліджень, зосереджених головним чином на збоях на національному рівні, ця стаття концептуалізує руйнування інфраструктури під час війни як джерело системного ризику поширення у взаємопов'язаних системах електроенергії. Ми розробляємо аналітичну структуру, яка об'єднує три виміри: ймовірність шоку, структурну вразливість і здатність до відновлення. Використовуючи дані за 2022–2026 роки та порівняльну оцінку окремих країн Європейської мережі операторів систем передачі електроенергії (ENTSO-E), ми виявили суттєву асиметрію у вразливості та стійкості. Молдова виглядає дуже вразливою через структурну залежність і обмежену гнучкість, тоді як Польща демонструє більшу стійкість, що підтримується диверсифікацією та інституційною спроможністю. Висновки показують, що потрясіння, що виникають в Україні, поширюються через потоки торгівлі електроенергією, обмеження балансування та нестабільність цін. Результати підкреслюють, що широкомасштабні атаки на енергетичну систему загрожують не лише безпосередній регіональній безпеці, але й довгостроковій енергетичній стійкості взаємопов'язаної європейської мережі. Стаття робить внесок у літературу, пов'язуючи пошкодження інфраструктури, спричинені війною, зі стійким управлінням енергетикою та пропонуючи такі інструменти стійкості, як цифрові близнюки та координація блокчейну. Результати актуальні для політиків, операторів транспортування та установ з управління кризами по всій Європі.

Ключові слова: КРИТИЧНА ЕНЕРГЕТИЧНА ІНФРАСТРУКТУРА; ENTSO-E; РОЗПОДІЛЕНА ГЕНЕРАЦІЯ; РИЗИК ПОТОКУ; СТРАЙКИ; ЕНЕРГЕТИЧНА СТІЙКІСТЬ; СТІЙКІСТЬ; СТАБІЛЬНІСТЬ; СЕРЕДОВИЩЕ; УКРАЇНА; ЄВРОПЕЙСЬКІ КРАЇНИ

ABSTRACT

Text pages – 86; drawings – 6; tables – 4; literary sources - 98.

This study investigates the cross-border consequences of large-scale military attacks on Ukraine's critical energy infrastructure and their implications for European energy resilience. Unlike prior research focused primarily on national-level disruption, this paper conceptualizes wartime infrastructure destruction as a source of systemic spillover risk within interconnected electricity systems. We develop an analytical framework integrating three dimensions: shock probability, structural vulnerability, and recovery capacity. Using evidence from 2022–2026 and comparative assessment of selected European Network of Transmission System Operators for Electricity (ENTSO-E) countries, we identify substantial asymmetries in exposure and resilience. Moldova appears highly vulnerable due to structural dependence and limited flexibility, whereas Poland demonstrates stronger resilience supported by diversification and institutional capacity. The findings show that shocks originating in Ukraine propagate through electricity trade flows, balancing constraints, and price volatility. The results highlight that large-scale attacks on the energy system threaten not only immediate regional security but also the long-term energy sustainability of the interconnected European network. The paper contributes to the literature by linking war-induced infrastructure damage with sustainable energy governance and by proposing resilience tools such as digital twins and blockchain coordination. The results are relevant for policymakers, transmission operators, and crisis management institutions across Europe.

Keywords: CRITICAL ENERGY INFRASTRUCTURE; ENTSO-E; DISTRIBUTED GENERATION; SPILLOVER RISK; STRIKES; ENERGY RESILIENCE; SUSTAINABILITY; STABILITY; ENVIRONMENT; UKRAINE; EUROPEAN COUNTRIES

ЗМІСТ

ВСТУП

РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ СТАНУ ПРОБЛЕМИ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ НАДІЙНОЇ РОБОТИ ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖ УКРАЇНИ

- 1.1 Аналіз літературних джерел
- 1.2 Аналіз факторів ризику в сучасних енергетичних системах України

РОЗДІЛ 2. РОЗРОБКА МОДЕЛІ ОЦІНКИ СТІЙКОСТІ ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИЧНОЇ СИСТЕМИ УКРАЇНИ

- 2.1 Складання структурної схеми комплексного електропостачання об'єкту
- 2.2 Застосування тесту Чоу для кількісної перевірки структурних зрушень

РОЗДІЛ 3. МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ СТІЙКОСТІ ЕНЕРГОСИСТЕМИ

- 3.1 Розробка математичної моделі для оцінки стійкості української енергосистеми
- 3.2 Обговорення результатів моделювання

ВИСНОВКИ

ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

ВСТУП

Сучасні геополітичні ризики, зокрема вторгнення росії в Україну, офіційно визначені Законом України “Про засади державної політики національної пам’яті українського народу» [1] як війни з 2014 р., є одними з найбільш ймовірних і критичних загрози глобального масштабу та визначені Всесвітнім економічним форумом у Global Risks звіт 2026 [2]. Результати цього опитування експертів свідчать про те, що збройні конфлікти і геоекономічне протистояння є одними з головних чинників системних ризиків у всьому світі 2025–2026 роки. Тому важливість проведення досліджень щодо їх впливу на глобальні енергетична безпека зростає за рахунок послідовної ескалації військових загроз та їх глобальні наслідки. Наші дослідження сприяють глибшому розумінню вітчизняного і транскордонні побічні ефекти, що виникають внаслідок тривалої російсько-української війни з того часу 2014 [1] для європейської та глобальної енергетичної безпеки.

Повномасштабні удари по енергетичній інфраструктурі України стали унікальними масштаб і тривалість прецеденту цілеспрямованого руйнування енергетичної системи майор Європейська держава. Енергетичний сектор, який традиційно виступає основою економічного активність, соціальна стабільність і безпека, стала однією з головних цілей. У цих умовах, питання стійкості енергетичної системи, здатності протистояти потрясінням, адаптуватися до їх і відновити, виходить за рамки суто технічних питань і набуває прямого економічного і геополітичне значення.

Актуальність даного дослідження зумовлена також тим, що енергетична система України інтегрована в європейський енергетичний простір і підключена до мережі ENTSO-E.

ENTSO-E – це організація, що об’єднує європейських операторів систем передачі (TSO), чії 40 членів TSO, що охоплюють 36 країн, контролюють надійне та скоординоване управління європейської електромережі, яка є найбільшою у світі об’єднаною енергетичною мережею. Це означає, що руйнування української критичної інфраструктури має транскордонний ефект,

створюючи так звані ризики поширення для ЄС. Ризик поширення - це ризик непряма передача, передача шоку чи кризи в одній країні, галузі, компанії, або продавати іншим учасникам через різні канали (фінансові, торгові, інформаційні тощо), створюючи для них додаткові збитки. У найзагальнішому вигляді ефект поширення є а ситуація, коли подія в «одній точці» системи породжує небажані наслідки для «нецільових» учасників, які не були безпосереднім об'єктом події [3,4]. У фінансах і макроекономіки, це описується як передача нестабільності, ризику або кризових шоків між ринками, регіонами чи країнами [5–7].

Це стосується не лише технічних ризиків синхронізації мережі, а й ринкових ефектів:

- зміни в потоках електроенергії,
- коливання цін на природний газ і вугілля,
- збільшення попиту на імпорتنі резервні потужності та обладнання.

Таким чином, знищення української енергетичної системи має прямі наслідки для європейської енергетичної безпеки.

Аналіз його впливу на енергетичні системи виходить за рамки традиційних категорій ризику і вимагає концептуального розуміння здатності систем протистояти, адаптуватися та відновлюватися багатовимірні поштовхи. Саме це призводить до звернення до категорії «стійкість», який все частіше використовується дослідниками для тлумачення процесів, пов'язаних з Російсько-українська війна.

Так, у [8] проведено комплексну оцінку впливу військових дій на енергосистему України було проведено та масштаби збитків критичної інфраструктури і фінансові втрати були визначені кількісно. Вони доводять, що стійкість енергетичної системи була забезпечується поєднанням екстрених заходів відновлення, міжнародної фінансової підтримки та регуляторні адаптації, зокрема у сфері тарифної політики та реструктуризації боргу.

Обґрунтовано, що інтеграція технічних, фінансових та управлінських рішень є ключовою передумовою для збереження стійкості України у воєнний час.

РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ СТАНУ ПРОБЛЕМИ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ НАДІЙНОЇ РОБОТИ ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖ УКРАЇНИ

1.1. Аналіз літературних джерел

Деякі автори розглядають категорію стійкості як відповідну відповідь на різні види ризиків. Автор [9] показує, як трансформувалося вторгнення росії Енергетичний ландшафт Європи від традиційної залежності від російських джерел енергії до стійкості через диверсифікацію поставок, адаптацію енергетичної політики та посилення внутрішні та транскордонні механізми енергопостачання. Автор доводить, що війна не тільки посилив ризики енергетичної безпеки, але й стимулював зміцнення інституційної, ринкової та технічної гнучкості енергетичних систем, дозволяючи європейським країнам ефективніше реагувати на зовнішні шоки.

Цей перехід від залежності до стійкості підкреслює важливість стратегічної інтеграції, диверсифікації джерел та адаптації політики щодо забезпечення енергетичної стійкості в умовах тривалого геополітичного потрясіння.

Крім безпосередніх наслідків для безпеки, систематичне знищення України енергетична інфраструктура є фундаментальним викликом для траєкторії «зеленого» переходу та сталого енергопостачання по всій Європі. Величезний термічний збиток електростанції парадоксальним чином виступили каталізатором «примусової декарбонізації», штовхаючи енергетична система в бік більшої залежності від безвуглецевих ядерних і відновлюваних джерел.

Однак цей перехід відбувається в умовах надзвичайної системної вразливості та бракує запланованої стабільності традиційного енергетичного переходу. Цей зсув є суттєвим ризики для соціального виміру сталого розвитку, зокрема через загострення палива бідності та загрози справедливому доступу до енергетичних ресурсів, які є основними стовпами.

Цілі сталого розвитку ООН (ЦСР).

Подібну точку зору поділяє Тампуболон [10], який досліджував вплив повномасштабного вторгнення росії в Україну на трансформацію глобальної геополітики системи через механізми міжнародних санкцій, збоїв у світовому

постачанні ланцюгів, дестабілізація енергетичних і товарних ринків. Автор показує, що військові дії та санкційний тиск призвели до зростання цін на енергоносії, сировину матеріалів і продовольства, посилюючи інфляційні процеси та економічну нестабільність у багатьох країнах Європи та світу. Серед ключових геополітичних ризиків – поглиблення енергетики і сировинної залежності окремих регіонів, зростання економічної незахищеності держав через порушення глобальних ланцюгів поставок, посилення інфляційного тиску та тривала нестабільність міжнародних політичних і торгових відносин.

У публікації [11] питання атак на критичну інфраструктуру України під також висвітлено умови гібридного та повномасштабного вторгнення, приділяючи особливу увагу стратегічні операції, спрямовані на енергетичні об'єкти. Дослідження аналізує уроки, отримані з цієї події для захисту та відновлення критичних систем. Автор наголошує, що страйки можуть поширитися за межі України та досягти території Європейського Союзу, що підсилює важливість міждержавної координації та будівництва стійких механізмів захисту критичної інфраструктури. Виходячи з наявних інформацій, зроблено попередні висновки щодо спроможності інфраструктури системи, щоб протистояти тривалим загрозам і адаптуватися до них, що, у свою чергу, підкреслює ключові аспекти стійкості енергетичних та інших критичних мереж у сучасній гібридній війні.

У статті [12] явища стійкості та стійкості об'єднані як інструменти для зниження ризику. Автори проаналізували різні сценарії нестабільності та небезпечних ризиків, спрямованих на критичну енергетичну інфраструктуру, зокрема стратегічні високовольтні підстанції.

Вони також визначили найбільш вірогідні сценарії відмови таких підстанцій через те й інше стихійних лих і навмисних ударів, що дає можливість оцінити вразливість енергетичних систем в умовах кризи. На основі цього була проведена кількісна оцінка ризику, реалізовано комплексну стратегію забезпечення стійкості енергетичних мереж, було розроблено, включаючи рекомендації для національних систем Румунії та Європейська мережа ENTSO-E, яка може слугувати моделлю підвищення стійкості критичної інфраструктури.

в регіоні. У роботі підкреслюється важливість інтеграції ризику оцінка в стратегічному управлінні енергетичною безпекою як ключовим компонентом стійкості адаптованість енергетичних систем до зовнішніх загроз.

Деякі автори [13] розглядають питання забезпечення стійкості енергетичної інфраструктури внаслідок військових та кіберзагроз. У статті розглядається стійкість енергії інфраструктури України військовим, терористичним та кібернетичним загрозам, які в умовах

Збройне вторгнення безпосередньо впливає на безперервність енергетичної системи та національну безпеку.

Автори аналізують здатність існуючої правової та інституційної системи забезпечити адаптивність, безпека та стійкість енергетичних об'єктів, виявлення структурних прогалин у координації державних органів та недостатня готовність нормативно-правової бази до протидії сучасні кіберризиків. Спираючись на міжнародний досвід і норми міжнародного гуманітарного права, існує потреба в оновленні правових механізмів як ключової передумови для підвищення стійкості енергетичної інфраструктури перед військовими та гібридними загрозами.

Інші автори [14] також наголошують на необхідності тримати в центрі уваги також правові аспекти удари по українській енергосистемі та пов'язані з ними кіберзагрози. Вони вважають українську енергетична інфраструктура як об'єкт системних гібридних загроз, що поєднують військові удари і складні кіберудари, наслідки яких виходять за рамки технічних збитків і безпосередньо впливають на економічну та соціальну стабільність держави. Автори обґрунтовують необхідність підтримувати правові та інституційні аспекти протидії ударам по енергетичній системі центр дослідницької уваги, вказуючи на прогалини в національному законодавстві у сфері критичного захисту інфраструктури та кібербезпеку. Підкреслюється, що підвищення стійкості енергетичного сектору можлива лише за умови формування цілісної правової моделі, узгодженої з Європейськими стандартами та спрямовані на інтеграцію технічного, організаційного та кіберзахисту механізми реагування на сучасні загрози. У статті Aljohani [15] основні ризики для енергетичної інфраструктури,

пов'язані з кібербезпекою були виявлені атаки, які можуть призвести до збоїв у мережі, матеріальних збитків та екологічної шкоди. Кілька ключових ризиків, пов'язаних з кіберзагрозами для енергетичної інфраструктури були визначені для Європи:

1) транскордонна вразливість енергетичних мереж робить інтегровані системи ЄС потенційні об'єкти для ударів, подібних до тих, що здійснюються в Україні;

2) збої в електромережі можуть спричинити збої у виробництві та транспортуванні енергетика, що завдає економічних збитків європейським країнам;

3) такі страйки несуть екологічні та соціальні ризики, оскільки вихід з ладу критичної інфраструктури може призвести до аварій на енергетичних об'єктах, що загрожує навколишньому середовищу та громадська безпека.

Нарешті, вони розглядаються як інструмент сучасної війни для політичного або військового просування цілі, посилюючи стратегічну вразливість Європи в умовах геополітичної напруженості. Автори аналізують хронологію страйків на електромережах, зокрема в Україні, та підкреслюють, що методи та технології кібератак можна адаптувати для використання в інших країнах, що робить електричні мережі глобально вразливими.

З 2022–2026 рр. актуальність кіберзагроз для економіки України не зменшилася, породжуючи нові виклики та проблеми також для європейського простору. В [16] автори визначають ризики для економічної безпеки українських підприємств у контексті російської кібератаки, що підкреслює системний характер загроз як фізичних, так і цифрових.

Особлива увага приділяється вразливості критичної інфраструктури, енергетики, телекомунікацій, логістики, фінансів та ІТ-секторів, де вони можуть спричинити фінансові збитки, репутаційні ризики, порушення контрактів і втрата інвестиційної привабливості. До зменшити ці ризики, автори пропонують розробку комплексного кіберзахисту стратегії та заходи цифрового захисту, які можуть підвищити економічну стійкість підприємств і захистити ключові сектори держави.

1.2. Аналіз факторів ризику в сучасних енергетичних системах України

Факторами, які є джерелами ризику, можуть бути не тільки прямі ракетні удари по державі системи, а й кардинальні зміни парадигми у сфері комп'ютерних технологій (квантові комп'ютери). Такої ж точки зору дотримуються автори [17]. Основна ідея їх вивчення полягає в тому, що децентралізація та розвиток розподіленої генерації енергії є ключовими чинники підвищення енергетичної безпеки України, але водночас формують нові інноваційні ризики, пов'язані з цифровізацією та кіберзагрозами. Наголошують автори що в умовах квантового перетворення традиційні криптографічні механізми стали вразливим через потенціал квантових комп'ютерів швидко зламувати коди, що створює значні загрози економічній безпеці енергетичних підприємств.

Вони виправдовують необхідність якнайшвидшого переходу до криптографічної гнучкості та впровадження багаторівневої «лінії захисту» від кібератак та кіберінцидентів у державі, галузі та на підприємстві рівні для мінімізації наслідків інноваційних ризиків в енергетиці.

Система законодавства України про захист критичної інфраструктури включає ряд нормативно-правових актів, що визначають правові та інституційні основи для функціонування та захист критичної інфраструктури, зокрема енергетичних систем [18]. Ці нормативні акти встановлюють механізми оцінки ризиків, планування безпеки, координації між органами державної влади та операторами інфраструктури та порядок взаємодії в надзвичайних ситуаціях, що посилює стійкість енергетичної інфраструктури під умовах масштабних ударів і гібридних загроз.

Законодавча база також стосується аспекту кібербезпеки захисту критичної інфраструктури, визначаючи інституційні обов'язки та механізми для захисту інформаційних систем, мереж і цифрових ресурсів критично важливих об'єктів від кібер загрози [19]. Ці положення доповнюють фізичний та організаційний захист механізмів критичної інфраструктури та сприяють

посиленню стійкості енергетичної системи до кібератак, які можуть мати як локальні, так і транскордонні наслідки. Додаткові урядові постанови визначають вимоги до кібербезпеки та організаційні процедури захисту об'єктів критичної інфраструктури, включно з енергетикою системи [20–22]. Ці правила встановлюють стандарти захисту інформаційних ресурсів та ІТ-інфраструктура, процедури ідентифікації та моніторингу об'єктів критичної інформаційної інфраструктури та механізми реагування на кіберінциденти.

У поєднанні з численними науковими дослідженнями, які підкреслюють важливість кібер оборона як критичний елемент енергетичної стійкості в контексті гібридних війн, ракет і безпілотні загрози [3–17], цей наказ є реакцією держави на еволюцію загроз і сприяє зменшенню як внутрішньої вразливості, так і потенційного поширення ризику для країн Євросоюзу.

В результаті енергетична інфраструктура України зазнала десятків мільярдів збитків, великі втрати потужностей і серйозні гуманітарні та економічні збої [2]. Для Європи, вони призвели до цінових шоків на енергоносії, реконфігурації поставок, ризиків рецесії тощо поштовх для прискорення декарбонізації та планування стійкості. Захист і відбудова енергосистеми України є водночас питанням національного виживання та опорою європейського економічна та енергетична безпека. У [23] визначено ключові втрати для української енергосистеми, спричинені масованими ракетними та безпілотними атаки, включаючи фізичне знищення генеруючих потужностей та об'єктів мережі, порушення цілісності системи передачі, втрата маневрування потужностей, загроза масштабних відключень споживачів. Автори підкреслюють, що ці страйки створюють системні ризики деградації стабільності та керованості влади системи, водночас ставлячи під сумнів здатність держави гарантувати безперебійність електропостачання у воєнний час. Водночас вони показують, що інституційні рішення та антикризові дії української влади стали вирішальними факторами збереження стійкості енергетичного сектору, зокрема шляхом оперативного відновлення пошкоджених об'єктів та адаптації режимів роботи енергосистеми до умов військові загрози.

Григорчук та ін. (2024) [24] всебічно обговорюють навколишнє середовище та здоров'я збитки в результаті вторгнення росії, зокрема екологічна шкода як прямий наслідок ударів по об'єктах критичної інфраструктури, в тому числі енергетичних. Вони доводять, що руйнування енергетичної інфраструктури має не тільки техногенний характер, а й довготривалий транскордонний характер та ризики для навколишнього середовища та здоров'я, які потенційно можуть вплинути на європейські країни. Автори також підкреслюють неадекватність міжнародних механізмів захисту навколишнього середовища під час збройних конфліктів, що посилює аргумент на користь необхідності підвищення стійкості захист критичної енергетичної інфраструктури як елемента європейської безпеки.

Найбільшою небезпекою для енергетичної інфраструктури України є ризик втрати контролю над ядерно-паливний цикл АЕС України. Це також наголошено в [25], зокрема увагу до таких ризиків, як наслідки тимчасової окупації Чорнобиля АЕС у 2022 році та Запорізька АЕС, яка станом на початок 2026 року залишається під контролем військових сил. Вони обмежують доступ для міжнародних перевірок і роблять повноцінний радіаційний контроль неможливим. Автори стверджують, що порушення енергопостачання, руйнування прилеглої інфраструктури та захоплення ядерних об'єктів створюють передумови за аварії з можливим викидом радіонуклідів і дестабілізацією всього ядерного паливний цикл.

Одразу після повномасштабного вторгнення Росії в Україну, підкреслюють деякі автори необхідність створення систем захисту об'єктів електроенергетики та електромереж. Таким чином, у публікації [26] вразливість об'єднаних енергетичних мереж України під аналізуються умови війни з наголосом на ризиках каскадного розвалу енергосистеми внаслідок фізичних ударів, зриву поставок палива та примусової генерації відключення. Автори підкреслюють стратегічну важливість захисту критично важливих об'єктів, зокрема атомних і гідроелектростанцій (ГЕС), а також необхідність запобігання системним збоям, які можуть мати транснаціональні гуманітарні та екологічні проблеми наслідки.

Особливу увагу приділено необхідності розвитку сталої енергомережі, плани відновлення та міжнародна підтримка як ключовий елемент підвищення енергетичної безпеки.

Лоза та Бондаренко [27] досліджують комплекс ризиків для українських енергетичних підприємств, що виникають в результаті комбінованих фізичних і цифрових ударів, включаючи руйнування теплових електростанцій (ТЕС), АЕС, трансформаторні підстанції та масштабні кібератаки. Це так наголосив, що такі загрози безпосередньо підривають економічну безпеку енергетичних компаній, порушують роботу енергосистеми та створюють фінансові збитки. Щоб зменшити ризики та керувати ними, автори пропонують впровадження європейської кібербезпеки стандартів, використання комплексного пакету профілактичних заходів і моніторингу та контроль кібератак, які значно підвищують стійкість підприємств та стабільність енергопостачання.

Суї та ін. [28] визначають основні ризики порушення енергосистеми як збої в глобальні ланцюжки поставок енергії, торговельні обмеження та санкції, які призводять до різкого зростання цін, коливання та структурні дисбаланси в національній та регіональній енергетичних системах. На основі багаторегіональної міжгалузевої моделі CGE, доведено, що припинення торгівлі енергією має значні макроекономічні наслідки як для України, так і для країн Європи. Мішика та Носко [29], як ключових ризиків для функціонування та стабільності енергетики ЄС системи, висвітлюють поєднання постпандемічних структурних дисбалансів і різкого зростання цін в Україні, яке призвело до критичної залежності від імпортової енергії та вразливості ланцюгів постачання. Автори дійшли висновку, що короткострокове зміщення політичних пріоритетів у бік енергетичної безпеки тимчасово послабив акцент на декарбонізації, одночасно створивши умови для перегляду підходів до «зеленої» трансформації.

Останні дослідження [30–35] переконливо довели, що війна Росії проти України стала потужним каталізатором системних побічних ефектів, трансформуючи локальні військові та енергетичні потрясіння у глобальні фінансові, макроекономічні ризики та ризики безпеки.

Емпіричні результати, засновані на TVP-VAR, мережевих і квантильних моделях, демонструють гостру збільшення взаємозв'язку між енергетичною, валютною, фінансовою та сировинною сферами ринків з початку війни, причому геополітичний ризик виступає ключовим фактором передачі нестабільності [30–33]. Особливо показово, що енергетичні ринки, зокрема природного газу та нафти, стали центральними центрами ризику, через які знищення енергетичної інфраструктури України створює каскадний ефект для фінансових систем України країни Європи [34,35].

Дослідження фінансової стабільності доповнюють цей висновок, фіксуючи значний збільшення волатильності суверенних боргових інструментів і зміна ролей країн у глобальних мережах ризику. Зокрема, російське вторгнення в Україну спричинило низку держави до переходу від статусу одержувачів ризику до його активних передавачів, що є супроводжується багатоетапним процесом потрясінь, що поширюються з безпосередніх українців сусідів до ширшого європейського простору [36,37]. Водночас режими санкцій і значно посилено обмеження доступу до фінансової інфраструктури, наприклад SWIFT довгострокові нестабільні побічні ефекти, підкреслюючи структурну природу вразливостей формується в таких складних умовах [38].

Макроекономічний вимір цих процесів проявляється в безпрецедентному зростання інфляційних побічних ефектів у країнах Європи та Північної Америки, в рівень якого перевищив навіть показники енергетичної кризи 1970-х років.

Це свідчить про те, що удари по енергетичній інфраструктурі України мають не лише короткострокові цінові наслідки, а й довгострокові структурні ризики для стійкості економіки. інших країн [39]. У той же час зростає роль уваги інвесторів і інформаційні шоки підвищують нестабільність ринку, перетворюючи воєнні події на фінансові ризики, що самозміцнюються [40]. Просторовий вимір побічних ефектів додатково підтверджує, що географічні та економічна близькість до України сьогодні є визначальним фактором. Існування емпірично доведено так званий «штраф близькості», під яким знаходяться країни ближче до зони бойових дій зазнають більш значні

втрати на фондових ринках, що пояснюється як торговими зв'язками, так і зростанням ризиків хвоста війни [41]. Подібним чином, надзвичайний ризик поширення наслідки зафіксовані на сільськогосподарських ринках, особливо для пшениці, що підкреслює тісний зв'язок між енергетичною інфраструктурою, продовольчою безпекою та економічною стабільністю [42].

Водночас низка досліджень вказує на асиметричну та нерівномірну передачу геополітичних ризиків, зокрема в банківських секторах пострадянських країн, де прямий вплив може бути обмеженим, але приховані структурні вразливості зберігаються і можуть стають активними з часовими затримками [43]. У ширшому контексті безпеки — війна [44] або збройна конфлікт [45] радикально змінив архітектуру регіональної та міжнародної безпеки, посилення ролі військового, енергетичного та фінансового факторів у формуванні нових альянсів та політики стримування.

Синтезуючи ці різноманітні дослідницькі потоки, очевидно, що значне дослідження існує прогалина щодо формалізованої кількісної оцінки того, як локалізовано руйнування під час війни перетворюється на системні регіональні ризики. Це дослідження заповнює цю прогалину шляхом введення інтегрованого аналітична тріада ризику, стійкості та стійкості. На відміну від суто описових підходів, наш внесок полягає в операціоналізації військових ударів як вимірної побічної змінної в рамках інтегрованої мережі ENTSO-E, забезпечуючи відтворювану структуру для оцінки вразливості між країнами та проактивного управління цифровими ризиками.

Підсумовуючи, наявні наукові дослідження свідчать про те, що удари по Україні Критична енергетична інфраструктура є системним фактором дестабілізації, який виходить далеко за межі національному контексті та створює багатовимірні ризики поширення для європейських країн. Це обґрунтовує необхідність розгляду енергетичної стійкості не лише як технічної чи національної проблеми але як ключовий елемент колективної стійкості економіки та безпеки Європи.

Щоб правильно оцінити стійкість і наслідки ударів, необхідно чітко зрозуміти, якою була українська енергосистема до початку повномасштабного вторгнення і

як змінилася його структура за останні п'ятнадцять років. Аналіз динаміки і структура виробництва електроенергії за джерелами генерації за 2009–2024 рр. дозволяє нам сформувати базову картину еволюції енергетичного балансу. Це дає можливість визначити основні етапи її трансформації: період стабільного зростання на початку 2010-х рр., посткризова адаптація після 2014 року та енергетичні шоки 2022–2024 років.

Особливе значення має вивчення структурних зрушень між основними видами виробництва енергії — атомна, теплова, гідроенергетика та відновлювані джерела. Структура генерації визначає профіль вразливості енергетичної системи: концентрацію о потужності у великих теплових установках робить систему більш чутливою до цілеспрямованих ударів, тоді як розвиток ядерної та розподіленої відновлюваної генерації збільшує потенціал стійкості. Відповідно проведено аналіз структури виробництва електроенергії дозволяє пояснити, чому окремі сегменти енергетики стали основними об'єкти страйків і які економічні збитки спричинило їх відключення.

У цьому контексті стійкість тісно пов'язана з більш широкою концепцією стійкості, яка охоплює не лише здатність енергетичних систем протистояти та відновлюватися потрясінь, а й для підтримки тривалої функціональної стабільності в умовах безперервного невизначеність. З цієї точки зору ризик, стійкість і стійкість є інтегрованими аналітична тріада: ризик відображає ймовірність і масштаб руйнівних подій, стійкість характеризує здатність системи поглинати та адаптуватися до цих шоків, водночас стійкість фіксує здатність забезпечувати стабільне та безпечне енергопостачання з часом, незважаючи на постійне зовнішні загрози. Незважаючи на велику кількість досліджень енергетичної безпеки та наслідків війни в Україні залишається значна дослідницька прогалина в концептуалізації активного військового знищення як джерело системного транскордонного ризику поширення в рамках інтегрованої електроенергетичної системи. Сучасна література переважно розглядає енергетичну стійкість як локалізовану технічну проблему або фокусується на ширших геоekonomічних потрясіннях. Існує помітна нестача формалізованих методологій, які б розглядали цілеспрямовані пошкодження

інфраструктури під час війни як багатовимірний зовнішній шок здатні викликати «ризики поширення» в регіональній мережі, як-от ENTSO-E. Це дослідження заповнює

ця прогалина шляхом переміщення аналітичного фокусу з порушень національного рівня на системні регіональні вразливості та пропонування формалізованої основи для їх кількісної оцінки.

Новизна дослідження полягає в обґрунтуванні того факту, що масивна ракета і

Удари безпілотників росії по енергетичній інфраструктурі України формують не лише військову – юридичний вимір, але також виступають як системний зовнішній шок для інтегрованого енергетичного простору, що перетворюється на транскордонні ризики поширення для країн ENTSO-E.

У документі вперше пропонується формалізована рамкова модель ризиків перетікання для ENTSO-E, враховуючи системний характер загроз, що виникають внаслідок руйнування енергетична інфраструктура України. Модель об'єднує три ключові параметри — їх ймовірність, структурну вразливість і здатність країн до відновлення — і дозволяє кількісну оцінку ризиків для кожної країни-члена ENTSO-E. Оригінальність підходу полягає в поєднанні емпіричних даних про страйки з функцією ризику, яка відображає характер поширення енергетичних ударів. Результати моделювання мають практичний характер значення для сценарного планування, енергетичної дипломатії та управління кризою.

Метою дослідження є розробка та перевірка кількісної моделі оцінювання транскордонні ризики поширення для країн ENTSO-E, спричинені російськими ударами в Україні щоб визначити найбільш уразливі країни та сформулювати науково обґрунтовані рекомендації щодо підвищення стійкості енергетичної системи регіону.

Для досягнення мети дослідження ставило за мету виконати наступні завдання:

- підвести підсумки і систематизувати статистичні та емпіричні дані про масові загрози ракет і безпілотників для критичної енергетичної інфраструктури України з 24 лютого 2022 року по січень 2025 року;
- проаналізувати динаміку виробництва електроенергії та зовнішньої торгівлі електроенергією в Україні в цьому період; розробити класифікацію основних ризиків переливу для європейських країн; до обґрунтувати напрями підвищення стійкості енергетичних систем України та країни ЄС шляхом використання інноваційних цифрових інструментів управління ризиками; запропонувати рамкову модель для оцінки транскордонного поширення енергетичних шоків.

2. Матеріали та методи дослідження

Методологічна основа дослідження поєднує декілька взаємодоповнюючих аналітичних підходів, спрямованих на оцінку транскордонних наслідків атак на українські території енергетична інфраструктура. Дослідження об'єднує структурний і динамічний аналіз електроенергії тенденції генерації в Україні, порівняльний аналіз вразливості сусідніх країни ENTSO-E та формалізована модель оцінки ризику поширення. Пропоновані рамки включають кілька ключових параметрів, включаючи ймовірність страйків, структурна вразливість національних енергосистем та їх відновлювальна здатність. Такий підхід дає змогу оцінити потенційне транскордонне поширення енергії потрясінь в умовах високої геополітичної невизначеності.

Дослідження базується на комплексному кількісному та порівняльному аналізі трансформації української електроенергетичної системи та пов'язаного з нею транскордонного ризику поширення для європейських країн в рамках інтегрованої енергетичної системи ENTSO-E умови війни.

Емпіричну основу дослідження утворюють декілька взаємопов'язаних масивів офіційних статистична інформація.

По-перше, дані про виробництво електроенергії в Україні за період 2009–2024 рр. сформовано на основі кількох офіційних джерел з метою забезпечення часових спадкоємність і порівнянність показників [46,47]. Дані за 2009 рік взяті з МАГАТЕ

Профілі ядерної енергетики країни, видання 2013 [48]. Дані за 2010–2014 та 2015–2023 рр отримано від Державної служби статистики України, в тому числі сталого розвитку показник 7.1.1 «Виробництво електроенергії, млрд. кВт·год» [46,47]. Дані за 2024 рік були додатково перевірено за допомогою міжнародних статистичних платформ (Our World in Data, EXPRO Consulting, Countryeconomy) [49–51] для узгодження агрегованих показників.

По-друге, інформацію про імпорт, експорт та сальдо зовнішньої торгівлі електроенергією України за 2022–2024 рр. отримано з офіційних річних звітів ENTSO-E [52–54], що базується на даних ENTSO-E та відображає фізичну міждержавну електроенергію потоки. Цей набір даних дав змогу оцінити зміну ролі України в Європі енергетичного простору та зафіксувати перехід від моделі чистого експортера до режиму критичного залежності від імпорту в періоди пікового навантаження.

По-третє, провести порівняльний аналіз між країнами, дані про обсяги виробництва електроенергії, чисельність населення та виробництво електроенергії на душу населення для України, Польщі, Угорщини, Словаччини, Румунії та Молдови за 2009–2024 роки. Джерела були зі статистичних матеріалів ENTSO-E, національні статистичні служби та гармонізовані міжнародні бази даних, що забезпечують порівнянність показників в рамках об'єднаної енергетичної системи.

По-четверте, контекстуалізувати структурні та кількісні зміни у функціонуванні енергосистеми України, інформація про масштабні ракетні та безпілотні загрози в енергетиці об'єктів інфраструктури було систематизовано в період з 24 лютого 2022 року по січень 2026 року дані були зібрані на основі офіційних повідомлень органів влади України, відповідних державних інституцій та авторитетних ЗМІ. Ця інформація була використана для визначення періодів найбільших потрясінь у виробництві та передачі електроенергії та для пояснення спостережуваного зміни у виробництві та транскордонні потоки.

Аналітична реалізація запропонованої системи базується на поєднанні структурний, динамічний і порівняльний аналіз, що дозволяє отримати

комплексну оцінку трансформації енергетичної системи України та пов'язаних з цим транскордонних ефектів.

Структурний аналіз використовувався для вивчення зміни співвідношення між основними видами генерації (атомної, теплової, гідроенергетики та відновлюваних джерел енергії (ВДЕ)) та визначити довгострокові трансформації архітектури української енергосистеми. Динамічний аналіз дозволив простежити зміни обсягів виробництва електроенергії та виробництва на душу населення, а також показники імпорту, експорту та зовнішньоторговельного балансу електроенергії з виявлення структурних зламів, пов'язаних з військовими потрясіннями. Порівняльний аналіз було використано для порівняння показників України з даними сусідніх країн ENTSO-E з метою оцінки асиметрії вразливості та рівня стійкості системи. Формально підтвердити наявність структурного розриву в часовому ряді виробництва електроенергії у зв'язку з повномасштабним вторгненням, був застосований формальний тест Чау. Цей тест дозволив для ретельного статистичного порівняння між довоєнною структурною тенденцією (2009–2021) та період військового шоку (2022–2024), гарантуючи, що ідентифіковані зрушення математично значущі, а не випадкові.

Окремим методологічним елементом дослідження є запропонована класифікація ризиків поширення для європейських країн внаслідок ударів по енергетичній інфраструктурі України. Він формується на основі узагальнення результатів емпіричного аналізу, системний підхід до оцінки критичної інфраструктури та сучасні концепції енергетики стійкості. Класифікація охоплює енергетичні, економічні, фінансові, геополітичні, екологічні і соціально-політичні ризики поширення, а також визначає ключові канали їх поширення, можливі методи діагностики, кількісного вимірювання та сфери управління ризиками. Зазначена класифікація використовується в дослідженні як аналітична основа, що дозволяє систематизувати результати кількісного та порівняльного аналізу, інтерпретувати ідентифікувати трансформації в рамках ENTSO-E та обґрунтувати доцільність запропонованої рамкової моделі для оцінки ризиків переливу. Це також служить основою для подальшого аналізу

сценаріїв та формування рекомендацій щодо підвищення системної стійкості енергетичних систем України та країн Європи в умовах воєнних і гібридні загрози.

Запропонована інтегральна модель ризику (IRM) концептуально обґрунтована в системному рамки оцінки ризику, встановлені в літературі щодо енергетичної стійкості та переливу ефекти. Формалізуючи зв'язок між ймовірністю (P), структурною залежністю (V_i), і індекс наслідків (C_i), модель виходить за рамки детермінованих припущень у напрямку інструмент багатосценарної діагностики, спеціально відкалібрований для середовищ із високим рівнем невизначеності, наприклад велика європейська держава у військовій облозі.

Для забезпечення порівнянності між країнами всі кількісні показники включені до рамкова модель була нормалізована за допомогою мінімально-максимального масштабування до порівнянного діапазону між 0 і 1. Цей підхід дозволив інтегрувати виміряні різномірні змінні в різних одиницях, включаючи виробництво електроенергії, залежність від імпорту, резервні потужності, і показники відновлення. Вищі нормалізовані значення відповідають вищим рівням вразливості або вплив наслідків. Вагові коефіцієнти компонентів моделі були визначені за допомогою експертно-орієнтованого пропорційного підходу, заснованого на концептуальній важливості кожного параметра в рамках ризику поширення. До трьох було застосовано однакове базове зважування основні параметри (ймовірність потрясінь, структурна вразливість і здатність до відновлення) в щоб уникнути надмірного представлення будь-якого окремого фактору в умовах високої невизначеності та обмежена доступність даних військового часу.

Оцінка параметрів ризику поєднувала статистичні спостереження з експертною інтерпретацією на основі сценаріїв. Параметр ймовірності оцінювався за частотою та інтенсивністю задокументованих ударів по критичній енергетичній інфраструктурі у 2022–2026 роках. Структурна вразливість відображала ступінь імпортозалежності, концентрацію генерації потужностей та інтеграції в міждержавні потоки електроенергії. Здатність до відновлення

оцінювалася за показниками, пов'язаними з генерацією резервів, потенціалом диверсифікації, наявність міжконекторів та інституційна адаптивність.

Крім того, рамковий підхід використовує елементи подієвої інтерпретації потрясінь, сценарного аналізу та експертної параметризації, яка є методологічно обґрунтованою для дослідження систем з високим рівнем невизначеності. Такий підхід дозволяє комбінувати статистичні результати з якісною оцінкою транскордонних ризиків та формування цілісного бачення механізмів їх поширення в інтегрованому європейському енергетичному просторі.

Під час підготовки цього рукопису автори використовували GPT-4 (OpenAI) граматику, перевірку орфографії та дрібне редагування мови.

РОЗДІЛ 2. РОЗРОБКА МОДЕЛІ ОЦІНКИ СТІЙКОСТІ ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИЧНОЇ СИСТЕМИ УКРАЇНИ

2.1. Основні теоретичні положення

Проведене дослідження впливу ризиків руйнування енергетики України інфраструктури внаслідок російського вторгнення дозволило провести систематичну класифікацію ризику поширення для європейських країн, зокрема економічні, фінансові, енергетичні та інституційні канали їх поширення (табл. 1).

Ми обґрунтували відповідні методи діагностики та кількісної оцінки переливу ризику для країн Європи внаслідок ударів по енергетичній інфраструктурі України вид ризику:

1. Енергодефіцит та перебої з електро- та газопостачанням. Аналіз сценарію затемнення використовується для моделювання каскадних збоїв у критичній інфраструктурі фізичної та кібернетичної напади. Оцінка вразливості мережі ENTSO-E передбачає аналіз здатності об'єднаної європейської енергетичної системи для підтримки синхронної роботи під випадання окремих вузлів. Технічний аудит підстанцій та електропередач лінії (PTL) доповнюються стрес-тестами, які імітують умови екстремального навантаження та надзвичайні ситуації. Відповідні ключові кількісні показники вимірювання – показники надійності енергосистеми: індекс середньої тривалості переривання системи (SAIDI) та системний середній індекс частоти переривань (SAIFI). Це теж доцільно використовувати оцінку резервної потужності (в мегаватах, МВт), ймовірність відмови окремих елементів мережі та матрицю ймовірності $\times$ наслідків, яка дозволяють формалізувати ризик каскадних аварій.

2. Волатильність цін на газ та електроенергію. Варто виявити побічні ефекти ціни з використанням економетричних моделей волатильності узагальненої авторегресійної умовної гетероскедастичності (GARCH) і гетерогенної авторегресійної моделі (HAR), які дозволяють фіксувати коротко-, середньо- та довгострокові коливання цін.

Мережевий аналіз взаємозв'язків (з'єднань) за допомогою підходу Дібольда–Їлмаза дозволяє для відстеження передачі цінових шоків між ринками газу та електроенергії.

Таблиця 1. Класифікація ризиків переливу для країн Європи через удари по енергетиці України інфраструктура.

Type of Spillover Risk	Channels of Influence	Diagnostic Methods	Quantitative Measurement Methods	Risk Management Recommendations
1. Energy shortages and electricity/gas supply disruptions	Falling electricity exports from Ukraine, disruptions in the transit of Russian gas through the Ukrainian gas transmission system, possible cascading accidents in the integrated European network	Analysis of blackout scenarios in critical infrastructure, ENTSO-E vulnerability assessment, technical audits of sub-stations and power lines, system stress tests	Power system reliability indices (SAIDI/SAIFI), reserve capacity (MW), probability of failure, probability $\times$ consequence matrices	Generation capacity backup, interconnector development, disaster recovery plans (network codes), agreed ENTSO-E protocols, early warning systems
2. Price volatility for gas and electricity	TTF/electricity prices due to supply and demand shocks, increased cross-country price spillovers	Econometric volatility models (GARCH, HAR), network analysis of connectedness (Diebold–Yilmaz), monitoring of futures markets	Total and directional volatility indices, spillover indices between electricity and gas markets, share of cross-dispersion in forecast error	Hedging (forwards, options), temporary tariff/tax measures for households and businesses, expansion of underground storage, joint gas purchases at the EU level
3. Macroeconomic shock (inflation, gross domestic product (GDP) decline, business spending)	Passing on higher energy costs along production chains, rising costs in energy-intensive industries, falling investments	Cross-sector (input–output) models, dynamic stochastic general equilibrium (DSGE) models, sectoral sensitivity analysis to energy prices	Estimate of GDP loss and consumer surplus, energy component of inflation, output elasticity to energy prices	Targeted budget support for the most vulnerable sectors, stimulating energy efficiency, accelerating the “green” transformation, R&D tax credits
4. Financial and stock risk	Increased interdependence between energy, stock, environmental, social, and governance (ESG) indices, increased systemic risks and shock transmission between sectors	Network risk analysis (conditional value at risk (CoVaR), Δ CoVaR, MES), quantile connectivity, cross quantilegram, high-frequency stock exchange data	Systemic risk indices, directional spillovers between energy, banks and other sectors, value at risk/CoVaR of portfolios	Portfolio diversification, inclusion of ESG as a “safe haven”, macroprudential buffers in banks, stress-testing of energy-intensive borrowers
Type of Spillover Risk	Channels of Influence	Diagnostic Methods	Quantitative Measurement Methods	Risk Management Recommendations
5. Geopolitical and security risk (escalation, hybrid strikes)	Expansion of strikes on critical infrastructure beyond Ukraine, use of energy as a tool of pressure, migration waves	Geopolitical risk indices, analysis of hybrid attack scenarios, national and EU energy security strategies, intelligence	Relationship between GPR shocks and energy market movements, frequency/scale of incidents against critical infrastructure, assessment of the likelihood of escalation	Strengthening physical and cyber infrastructure protection, NATO/EU coordination, joint escalation action plans, import diversification
6. Environmental nuclear risk (radiation and man-made accidents)	Potential strikes on NPPs, sub-stations, chemical facilities, cascading network failures with the risk of man-made disasters, transboundary pollution	Assessment of accident scenarios at NPPs and energy infrastructure, analysis of cascading failures in integrated networks, environmental risk analysis	Spatial models of pollution distribution, assessment of expected health/ecosystem losses, integrated indices of technogenic–environmental risk	Strengthening the physical protection of NPPs, backup power/cooling systems, joint European plans for responding to radiation incidents, supporting the resilience of the Ukrainian power grid
7. Socio-political risk (protests, distrust, inequality)	Rising energy bills, fuel poverty, possible protests against sanctions and energy policy, falling trust in institutions	Sociological surveys (Eurobarometer), analysis of protest activity, political and economic analysis of the perception of energy policy	Energy poverty indices, level of trust in institutions, share of income spent on energy, indicators of protest activity	Targeted subsidies for vulnerable households, transparent policy communication, investments in a “just transition”, strengthening trust in EU institutions

Важливим елементом є постійний моніторинг ф'ючерних ринків, зокрема Європейського газового хабу Title Transfer Facility (TTF). Як методи кількісного вимірювання використовуються індекси волатильності цін, загальної та спрямованої волатильності, а також переливу індекси, які показують частку коливань на одному ринку, викликаних потрясіннями в інший. Крім того, частка перехресної дисперсії в дисперсії помилки прогнозу оцінюється розкладання, що дозволяє кількісно виміряти глибину міжринкові цінові відносини.

3. Макроекономічний шок (інфляція, падіння ВВП, зростання витрат бізнесу). Для цього типу ризику, для аналізу доцільно використовувати міжгалузеві моделі витрат-виходів передача енергетичних шоків уздовж ланцюжків вартості. Моделі DSGE дозволяють оцінити макроекономічні наслідки енергетичних криз у динаміці з урахуванням поведінки домогосподарств, бізнесу та держави. Секторальний аналіз чутливості визначає які сектори найбільш вразливі до зростання цін на енергоносії. Кількісна оцінка включає втрати ВВП, скорочення споживчого надлишку, внесок енергії компонент інфляції та розрахунок еластичності випуску щодо енергії ціни, що відображає масштаб макроекономічних ефектів переливу.

4. Фінансові та фондові ризики. На нашу думку, мережевий аналіз системного ризику, який використовує показники CoVaR, Δ CoVaR (граничний внесок інституції або сектору до системного ризику) і граничного очікуваного дефіциту (MES), заслуговує на увагу. Методи квантильної зв'язності та крос-квантилограми дозволяють аналізувати перенесення ризиків у крайніх (напружених) квантилях розподілу доходів, використовуючи високочастотні дані фондового ринку. Для кількісних характеристик індексів системного ризику, індикатори спрямованих ефектів переливу між енергетичним сектором, банками та акціями ринку, а також класичні та умовні оцінки вартості під ризиком (VaR) і CoVaR для фінансових портфелів, можна використовувати.

5. Геополітичні та безпекові ризики. Цей тип ризику слід діагностувати за допомогою індекс геополітичного ризику (GPR), аналіз сценаріїв гібридних ударів та аналіз стратегії енергетичної безпеки на національному та

європейському рівнях. Діагноз повинен доповнюватися експертними оцінками та розвідувальною інформацією про загрози критична інфраструктура. Такі ризики можна кількісно оцінити за допомогою статистичного співвідношення між шоками георадара та динамікою енергетичних ринків, частотою та масштабами інцидентів з об'єктами критичної інфраструктури, а також ймовірність подальших ескалація конфлікту.

6. Екологічний та ядерний ризик. В якості діагностичного методу рекомендується використання сценарного аналізу аварій на АЕС та об'єктах енергетичної інфраструктури, як а також аналіз каскадних відмов в об'єднаних енергетичних мережах. Екологічний аналіз ризиків дозволяє нам оцінити потенційні транскордонні наслідки техногенних катастроф. Для кількісного вимірювання просторові моделі поширення забруднення, оцінки очікуваних втрат для здоров'я населення та екосистем, а також комплексні показники техногенного та екологічного ризику, є перспективними.

7. Соціально-політичний ризик. Для його діагностики використовуються соціологічні дослідження, зокрема Євробарометр, є традиційними, які поєднуються з аналізом протестної діяльності та політ та економічний аналіз сприйняття населенням енергетичної політики. Ключовими кількісними показниками є індекси енергетичної бідності, рівень довіри до інститутів, частка доходів домогосподарств, які витрачаються на енергоносії, та кількісні показники протестної активності. Такі діагностичні та кількісні методи вимірювання дозволяють не тільки ідентифікувати ризики поширення від ударів по енергетичній інфраструктурі України, а також оцінити масштаб їх транскордонне поширення та можливі наслідки для європейських країн.

Таким чином, ми запропонували інноваційні підходи до оцінки та зменшення переливу ризику, спрямовані на підвищення стійкості енергосистем України та Європи країн, а також аналітичну та практичну основу для подальших рекомендацій щодо застосування кількісних методів оцінки впливу, а також цифрових технологій з управління ризиками в енергетиці.

На нашу думку, перспективним інструментом оцінки таких ризиків є сукупність подій дослідження та відмінність у відмінностях, що дає змогу

кількісно відокремити прямий вплив військових загроз від ширших макроекономічних і транскордонних наслідків [55].

Застосування подібних методів до енергетики дозволяє виявити критичні моменти каскадних відмов і оцінити ефективність профілактичних заходів щодо їх пом'якшення.

Це створює аналітичну базу для розробки політики, спрямованої на зменшення вторинних ефектів наслідки страйків в українській енергосистемі для сусідніх ринків та енергетики безпеки європейських країн.

У контексті руйнування критичної енергетичної інфраструктури України та пов'язаних з нею транскордонних ризиків поширення, ми запропонували багатообіцяючий інструмент для збільшення системи стійкості — впровадження рішень енергетичного блокчейну. Децентралізована архітектура блокчейну дозволяє знизити вразливість до каскадних збоїв, забезпечуючи прозорий та незмінний облік операцій у сегментах генерації, балансування, імпорту та експорту електроенергії навіть за умов фізичного чи кібер погрози. Використання смарт-контрактів [56] може мінімізувати операційні та нормативні затримки під час кризові періоди, обмежуючи поширення енергетичних шоків на сусідні фінансово-сировинні ринки в Європі.

Крім того, енергетичні блокчейни можуть покращити координацію між національні оператори та європейські енергетичні системи, зменшуючи інформаційну асиметрію як а ключовий канал для побічних ефектів. У сукупності це становить технологічну основу для трансформація енергетичної безпеки від реактивної до проактивної моделі, що є критично важливим для довгострокову економічну стійкість України та її партнерів.

Ми вважаємо, що ще одним інноваційним інструментом для зменшення ризиків поширення може стати впровадження технології цифрових близнюків в управління енергетичною інфраструктурою. Цифрові близнюки енергогенеруючих об'єктів, мереж передачі та міждержавних з'єднань дозволяють для моделювання в реальному часі наслідків фізичних та кіберударів, оцінка ймовірність каскадних відмов і прогнозування транскордонного поширення енергії удари [57]. Використання таких моделей

підвищує здатність системи проактивно балансувати, оптимізувати імпорту та експорт електроенергії та приймати швидкі рішення за умов високої невизначеності. У ширшому європейському контексті цифрові близнюки полегшують координацію кризових сценаріїв між операторами транспортних систем, зменшення ризиків дестабілізації суміжних ринків та посилення колективної стійкості Європа-Україна енергетичний простір.

Реалізація запропонованих методичних та цифрових підходів вимагає кількісне відображення основних параметрів функціонування енергосистеми, через в яких проявляються як внутрішні втрати, так і транскордонні наслідки військових потрясінь. Отже, аналіз багаторічної динаміки виробництва електроенергії дозволяє переходити від концептуальних рішень до їх обґрунтування.

Вивчення динаміки та складу виробництва електроенергії в Україні від 2009–2024 рр. є необхідним елементом комплексної оцінки стійкості енергетична система в умовах війни. Система показників структури генерації, обсяги виробництва та контекст військових загроз є основою для висновків про наслідки ударів по критичній енергетичній інфраструктурі України. Аналіз статистичних даних за 2009–2024 рр. (табл. 2) демонструє поєднання двох процесів: заг. скорочення виробництва електроенергії та значні структурні зрушення в її генерації [49–51].

Кольорове кодування в останніх двох рядках відображає величину і напрямок відхилень виробництва електроенергії між 2009 і 2024 роками. Позитивні відхилення виділені тінями зеленого, а негативні відхилення показані відтінками червоного. Більш темні кольори вказують більші (значніші) відхилення, тоді як світлі кольори позначають менші помірні.

Спостережуване падіння виробництва електроенергії в Україні у 2022–2024 роках пояснюється як прямим збитком інфраструктури, так і ширшими соціально-економічними змінами. Пряма шкода включає руйнування ТЕС, гідроелектростанцій та мереж передачі внаслідок бойових дій, що призвело до негайної втрати генеруючих потужностей. Більш широкі соціально-економічні фактори включають зниження промислового попиту, порушення ланцюгів

постачання палива, старіння інфраструктури та тимчасові експлуатаційні обмеження. Розрізнення цих причин надає більш надійне пояснення різкого скорочення виробництва та підтверджує оцінка побічних ефектів для сусідніх країн ENTSO-E.

Таблиця 2. Динаміка та склад виробництва електроенергії в Україні за джерелами генерації 2009–2024 роки.

Year	Production (Total), Billion kWh	NPPs, Billion kWh	TPPs and Combined Heat and Power Plants (CHPs), Billion kWh	HPPs and Pumped Storage Power Plants (PSPPs), Billion kWh	RES, Billion kWh
2009	173.60	83.15	78.38	11.89	0.17
2010	188.80	94.34	81.37	12.80	0.28
2011	195.10	97.76	81.75	13.83	1.76
2012	199.10	100.45	83.02	13.24	2.39
2013	194.30	97.38	81.57	11.85	3.50
2014	183.70	95.34	73.11	12.49	2.76
2015	157.70	87.60	61.71	6.80	1.59
2016	154.80	81.01	63.10	9.10	1.59
2017	155.40	80.84	62.07	10.60	1.90
2018	159.40	84.40	60.30	12.00	2.69
2019	154.00	83.01	57.40	7.79	5.81
2020	148.90	76.19	54.21	7.59	10.90
2021	156.60	86.19	47.42	10.49	12.50
2022	113.50	62.20	30.80	11.00	9.50
2023	105.80	52.10	30.81	12.49	10.40
2024	100.00	53.00	29.87	6.13	11.00
Absolute deviation 2024/2009	-73.60	-30.15	-48.51	-5.76	10.83
Growth rate 2024/2009, %	57.60	63.74	38.11	51.55	6336.41

Джерело: аналіз авторів на основі [46,47,49–51].

Як зазначалося вище, за 2009 рік основним джерелом статистичної інформації є офіційний

База даних МАГATE “Country Nuclear Power Profiles 2013 Edition” [48], яка систематизує дані про структуру виробництва електроенергії за видами генерації. Це дозволяє нам охарактеризувати період до повномасштабного вторгнення у функціонування енергетики сектора в умовах поступового зростання попиту на електроенергію та реалізації політики підтримки атомної енергетики як базової складової балансу.

За 2010–2014 рр. як джерело використано дані Державної служби статистики України статистичної інформації [46]. За 2015–2023 рр. основним джерелом офіційної статистики є портал Державної служби статистики України показник сталого розвитку 7.1.1 «Виробництво електроенергії, млрд кВт*год» [47]. Цей набір даних дозволяє нам простежити динаміку виробництва електроенергії в контексті поступової адаптації економіки до умови безпеки.

Структуру генерації розглянуто за основними типами електростанцій: АЕС, ТЕС і ТЕЦ (ТЕЦ + ТЕС + блок-станції), ГЕС і ГАЕС (ГЕС/ГАЕС), ВДЕ. Виробництво електроенергії скоротилося з 173,6 мільярдів кВт-год у 2009 році до приблизно 100 мільярдів кВт-год у 2024 році. Це не лише результат руйнувань, пов'язаних із війною, але й наслідок довгострокових тенденцій деіндустріалізації, зниження попиту та старіння потужність генерації. Однак саме війна спричинила різкий спад у 2022–2024 рр. коли були зруйновані та пошкоджені значні частини теплової генерації та мереж.

Структурний аналіз показує, що ядерна енергетика стала відносно більшою опорою системи, тоді як частка ТЕС зменшилася.

Водночас ВДЕ показали безпрецедентне зростання як відносного, так і абсолютні терміни. Це свідчить про поступовий перехід до моделі енергосистеми, де АЕС і відновлювані джерела енергії складають основу, а ТЕС втрачають свою роль «хребта» системи.

Така трансформація має подвійну природу: вона одночасно посилює декарбонізацію і зменшує стійкість до ударів у короткостроковій перспективі через вразливість ядерної зброї і великі об'єкти, але в довгостроковій перспективі підвищує стійкість завдяки децентралізації та диверсифікація джерел генерації.

За період 2009–2024 рр. відбулися значні кількісні та структурні зміни місце в українській електроенергетиці. Тоді як з 2009–2012 рр. була тенденція у бік збільшення загального обсягу виробництва електроенергії з піковим значенням 199.1 млрд кВт/год у 2012 році, потім йшло поступове падіння, а з 2022 року різке скорочення в поколінні. У 2024 році загальний обсяг виробництва електроенергії оцінювався в 100 млрд кВт·год, що становить лише

57,6% від рівня 2009 р. і майже половину пікового показника початок 2010-х років. Таке скорочення пояснюється поєднанням довгострокових структурних кризові процеси та наслідки повномасштабної війни.

2.2 Застосування тесту Чоу для кількісної перевірки структурних зрушень

Тест Чоу був застосований у цьому дослідженні як метод кількісної перевірки структурних зрушень у виробництві енергії, що дозволяє ідентифікувати статистично значний структурний злам у динаміці виробництва електроенергії в Україні після 2022 року довгострокова траєкторія виробництва електроенергії в Україні демонструє постійне падіння 173,6 мільярдів кВт-год у 2009 році до приблизно 100 мільярдів кВт-год у 2024 році. У той час як візуальний аналіз тенденцій свідчить про кореляцію з повномасштабним вторгненням, сувора економетрична система потрібен, щоб ізолювати маргінальний ефект війни від хронічних змішуючих змінних.

У цьому дослідженні ми застосували тест Чоу, щоб розділити набір даних і визначити страйки інфраструктури 2022 року представляють фундаментальну зміну параметрів енергетики виробнича функція системи. Цей тест розрізняє продовження існуючого «хронічні» тенденції та гострий структурний злам, що характеризується нестабільністю параметрів і статистично значуще відхилення від нахилу регресії 2009–2021 рр. Регресія моделі використовують «Виробництво (загальне), млрд кВт*год» як залежну змінну (Y) і «Рік» (t) як незалежна змінна. На основі лонгітюдних даних набір даних розділено на три окремі пули для полегшення аналізу екзогенного шоку 2022 року (Таблиця 3).

Таблиця 3. Періодизація набору даних для аналізу структурних розривів.

Dataset Pool	Period	Observations (n)	Contextual Phase
Pooled Period (n_p)	2009–2024	16	Comprehensive longitudinal study duration
Sub-period 1 (n_1)	2009–2021	13	Pre-break (includes “classical” and “hybrid” phases)
Sub-period 2 (n_2)	2022–2024	3	Post-break (full-scale invasion and targeted strikes)

Щоб емпірично перевірити, чи є перехід 2022 року структурним зломом

ніж продовження тенденції 2009–2021 років, ми формулюємо наступні гіпотези у формальній формі академічна нотація. Нульова гіпотеза (H_0): $\alpha_1 = \alpha_2$ і $\beta_1 = \beta_2$. Параметри (перехил, нахил) моделі виробництва електроенергії є постійними протягом 2009–2021 років 2022–2024 роки. Це означає, що падіння викликане хронічними факторами (демографія, деіндустріалізація) і в 2022 році не відбулося значного структурного зриву. Альтернатива Гіпотеза (H_1): $\alpha_1 \neq \alpha_2$ і $\beta_1 \neq \beta_2$. Є істотна різниця в моделі параметрів між двома періодами, що підтверджує структурний розрив, розпочатий до 2022 року інфраструктурні страйки, які перекривають хронічну тенденцію.

Математична процедура для тесту Чоу передбачає порівняння залишкової суми квадратів (RSS) зведеної моделі проти суми залишків підперіоду моделі. Ми виконали лінійну регресію для всього періоду (2009–2024), щоб отримати об'єднана залишкова сума квадратів (RSS_p) та окремі регресії для підперіоду 1 (2009–2021) для отримання RSS_1 та Підперіод 2 (2022–2024) для отримання RSS_2 . Розрахунок F-статистики також було виконано:

$$F = \frac{(RSS_p - (RSS_1 + RSS_2)) / k}{(RSS_1 + RSS_2) / (n_1 + n_2 - 2k)},$$

де $k = 2$ (параметри: відрізок α і часовий тренд β), $n_1 + n_2 - 2k = 12$ (ступені свобода для знаменника).

Емпіричні дані вказують на статистично сильний зсув у виробництві. Всього виробництво різко впало з 156,6 мільярдів кВт-год у 2021 році до 113,5 мільярдів кВт-год у 2022 році — однорічне скорочення на 27,5% — перш ніж досягти найнижчої позначки в 100,0 мільярдів кВт-год у 2024 році.

Ця величина зміни є статистично значущим відхиленням від 2009–2021 рр. регресивний тренд. Враховуючи високе розрахункове значення F порівняно з критичним F-значення на рівні значущості $\alpha = 0,05$ ($df_1 = 2$; $df_2 = 12$), ми відхиляємо H_0 . Розрахований F-статистика (F_{calc}) знаходиться в діапазоні 15–25, що значно перевищує критичний поріг 3,89 ($df_1 = 2$; $df_2 = 12$, $\alpha = 0,05$). Це високе значення зумовлене 13-кратним прискоренням падіння

виробництва, яке змістилося з довоєнної тенденції в 1,4 млрд кВт·год/рік до а військовий удар 18,8 млрд. кВт·год/рік. Такий результат математично підтверджує, що вторгнення 2022 року є домінуючим структурним зломом, а не простим продовженням попередня деіндустріалізація чи демографічні тенденції.

Фізичні каталізatori цього структурного розриву добре задокументовані: 13 масивних хвиль страйків у 2024 році, окупація Запорізької АЕС, знищення Каховської ГЕС, і підтверджена втрата приблизно 10 ГВт генеруючої потужності. Ці події служили «чому» за зсувом перетину α , перетворюючи енергетичну систему з режиму «післякризової адаптації» до режиму «екстремального виживання». Застосування тесту Чоу перетворює «правдоподібну заяву» про вторгнення в 2022 році емпірично перевірений факт шляхом ізоляції гострого маргінального ефекту війни від довгострокової хронічної тенденції, такі як деіндустріалізація та старіння інфраструктури. Ця надійна статистика підтвердження підкріплює центральну тезу дослідження: період 2022–2024 років є не просто продовження тенденції до зниження, але унікальний структурний зсув, спричинений озброєнням вимагає нових парадигм європейської енергетичної безпеки та планування сценаріїв.

Аналіз складу виробництва за видами генерації показує, що атомна влада залишалася основною протягом усього періоду дослідження. У природному вираженні електрика

Виробництво на АЕС у 2009 р. становило 83,15 млрд кВт·год, а у 2024 р. – близько 53 млрд. кВт/год. Незважаючи на зменшення абсолютних обсягів (–30,15 млрд кВт·год), частка АЕС у структурі виробництва зросла з 47,9% до 53%. Збільшення частки АЕС у структурі генерації з 47,9% до 53% пояснюється тим, що інші типи генерації, зокрема ТЕС, зазнали значно абсолютну падіння на 48,51 млрд кВт·год за той самий період, тоді як ядерне виробництво показувало менше скорочення на 30,15 млрд кВт/год. Отже, тоді як загальна генерація впала до 57,6% порівняно з рівнем 2009 року атомна енергетика зміцнила свою роль «базового стовпа» української системи енергозабезпечення, зберігаючи

системну стабільність навіть за умов високої військової та структурна невизначеність.

ТЕС і ТЕЦ показали найбільш значне падіння як в структурному, так і в абсолютному вираженні умови. У 2009 р. ТЕС і ТЕЦ виробили 78,38 млрд кВт/год електроенергії, а в 2024 р. менше 30 млрд. кВт·год, тобто скорочення склало 48,51 млрд. кВт·год. Частка теплової генерації знизилася з 45,15% до 29,87%, що супроводжувалося темпами падіння до 38,11% від рівня 2009 року. Це пов'язано зі старінням основних засобів, екологічними вимогами згідно з директивами ЄС, а також довоєнний структурний спад, що призвело до зменшення частки ТЕС до 30,28% до 2021 року. Останніми роками це прискорилося через масове знищення інфраструктура. Незалежно від війни, стратегічний прогноз України спрямований на поетапність виведення з експлуатації решти вугільних блоків до 2035 року.

Гідроенергетика з 2009–2024 рр. не зазнала суттєвих структурних змін у відсотковому вираженні, але її абсолютний спад з 11,89 до 6,13 млрд кВт·год має глибокі експлуатаційні зміни наслідки. Це зниження в першу чергу проявляється як критична втрата маневреної здатності і гнучкості балансування, оскільки ГЕС є основним інструментом для регулювання частоти в українській енергетичній мережі. Зменшення доступної гідропотужності, зумовлене гідрологічними умовами та руйнуванням інфраструктури, такої як Каховська ГЕС, змушує систему більшою мірою покладатися на імпорту аварійного балансування з мережі ENTSO-E для підтримки стабільності в періоди пікового навантаження.

Найбільш виражену позитивну тенденцію продемонстрували ВДЕ. У поколінні їх частка зросла з 0,10% у 2009 році до 11,0% у 2024 році, що забезпечило структурний зсув +10,9 в.п. В абсолютному вираженні виробництво електроенергії з ВДЕ зросло з 0,17 до 11,0 млрд. кВт·год, тобто на 10,83 млрд. кВт·год, а темп зростання порівняно до 2009 року становила 6336,41%. Зростання відбулося за рахунок впровадження «зеленого тарифу», інституційна підтримка інтеграції в Енергетичне Співтовариство, здешевлення обладнання та

диверсифікація джерел генерації.

Наведені статистичні дані дозволили здійснити комплексний аналіз динаміки виробництва електроенергії в Україні за 2009–2024 рр., простеживши трансформацій та визначення основних причин структурних зрушень у генерації.

Період охоплює докризову фазу, післякризову фазу відновлення, роки російського гібридного вторгнення в Україну, повномасштабна війна, а також останній етап енергетичної системи функціонування в умовах руйнування системної інфраструктури.

З 2009–2012 рр. відбулося зростання загального виробництва електроенергії: з 173,6 до 199,1 млрд кВт/год. Така динаміка була зумовлена поступовим відновленням економіки після світова фінансова криза 2008 року, зростання промислового виробництва та розширення споживання електроенергії в домогосподарствах. У зазначений період ключову роль у генерації відігравали АЕС, частка яких стабільно перевищувала 50%.

Структурно атомна генерація показала тенденцію зростання з 47р.9% у 2009 році і більше 50% після 2011 року, що пояснюється як його відносно низькою вартістю, так і обмеженими можливостями для підвищення теплогенерації. Протягом 2000-х і початку 2010-х років постачався природний газ

близько 40% споживання первинної енергії в Україні з покриттям внутрішнього виробництва приблизно 25% внутрішнього попиту та понад 60% споживання компенсується імпортом, переважно з росії [58,59].

В окремі роки витрати на імпорт газу досягали 8% ВВП, що різко збільшувало вразливість енергетичного сектору до зовнішніх шоків цінового та політичного характеру [60].

При цьому вугілля забезпечувало близько третини споживання первинної енергії, а ТЕС генерували 25–30% виробництва електроенергії, тоді як Україна з 2010–2014 років щорічно імпортувала в середньому 6,7 млн т енергетичного вугілля для покриття дефіциту власної сировинної бази [61].

Поєднання високої імпортової залежності від газу та вугілля, старіння основних фондів ТЕС, та цінові ризики на зовнішніх ринках об'єктивно обмежували потенціал зростання теплової генерації, посилення ролі атомної енергетики як основного джерела електропостачання.

У свою чергу, частка теплової генерації за цей період поступово зменшувалася 45,15% у 2009 р. до 39,8% у 2014 р. Зменшення ролі ТЕС і ТЕЦ відбулося за рахунок не тільки до економічних факторів, а й до підвищених екологічних вимог до великих установок для спалювання. Після приєднання України до Енергетичного співтовариства в 2011 році [62] держава імплементувала вимоги Директиви 2001/80/ЕС [63] щодо обмеження викидів діоксиду сірки, оксидів азоту та пилу від великих установок з потужністю, що перевищує 50 МВт, і згодом положення Директиви 2010/75/ЄС [64] промислових викидів, які запровадили стандарти найкращих доступних технологій.

У рамках виконання цих зобов'язань розпочато план скорочення викидів з великих спалювальних установок, який передбачав або глибока модернізація, або поетапне виведення з експлуатації морально і фізично зношених блоків ТЕС. Висока вартість екологічної модернізації в поєднанні з підвищенням у цінах на імпорتنі енергоносії, об'єктивно обмежували можливості зростання теплової генерації та сприяв відносному зростанню частки атомної енергетики.

Гідроенергетика відігравала стабільну, але відносно невелику роль у структурі генерації з 2009–2014 рр. (6–7%). Коливання його частки визначалися переважно гідрологічними умовами і ступінь наповнення водойм. Змін у функціоналі не було характер цього сегмента протягом зазначеного періоду.

Найбільш динамічна складова структури виробництва електроенергії з 2009–2013 рр. був ВДЕ. Частка ВДЕ зросла з 0,1% у 2009 році до 1,8% у 2013 році.

Це безпосередньо пов'язано із запровадженням «зеленого тарифу» у 2008 р. через внесення змін до статті Закону України «Про електроенергетику» [65] та, відповідно до цього документа, збільшення тарифів на електроенергію з відновлюваних джерел. Законодавче регулювання дає гарантію купівлі

електроенергії з ВДЕ за стимулюючими тарифами, прив'язаними до курсу євро та пріоритетний доступ таких виробників до мережі, що призвело до збільшення інвестицій у сонячну енергетику та вітрові електростанції. Додатковим фактором зростання стало поступове наближення екологічної політики України до стандартів Європейського Союзу та виконання зобов'язання в рамках Енергетичного Співтовариства.

З 2014 року в енергосистемі України відбуваються якісні зміни.

До втрати призвела анексія Криму та початок бойових дій на сході країни частини генеруючих потужностей, зміни в логістиці постачання вугілля та зменшення у виробництві електроенергії до 183,7 млрд. кВт·год у 2014 р. Частка ТЕС у Структура генерації знизилася, а роль атомної енергетики як відносно стабільна

Джерело збільшилося.

У 2015 році українська економіка перебувала в глибокій рецесії, про що свідчить падіння у реальному ВВП майже на 10%, спад промислового виробництва та різке падіння внутрішнього попиту. Це призвело до зниження виробництва електроенергії до 157,7 млрд кВт/год та зниження навантаження на ТЕС. З 2015–2016 рр. загальне виробництво електроенергії знизився до 154,8 млрд. кВт/год, що відображає наслідки економічного спаду та технологічні втрати, пов'язані зі зменшенням використання вугільних потужностей.

При цьому частка АЕС у 2015 р. зросла до 55,55%, що свідчить про перехід до ядерної генерації як базового джерела живлення.

У наступні роки (2017–2019) обсяги виробництва електроенергії стабілізувалися на рівні 154–159 млрд кВт/год. Для цього періоду характерна відносна рівновага між електропопитом і пропозицією за відсутності різких структурних змін у промисловості.

Помітною тенденцією є зниження частки ТЕС і ТЕЦ до 37% у 2019 році.

Основними факторами цього зниження є дефіцит антрациту, збільшення витрат на ремонт теплових одиниць, а також суворіші екологічні вимоги. Частина теплової потужності була або переведені на газ, або працюють в обмежених режимах. Гідроенергетика продовжувала виконувати переважно

маневрової функції з 2015–2019 рр. Частка ГЕС та ГАЕС коливалася від 4,3 до 7,5 %, при цьому максимальні значення зафіксовані в роки сприятливих гідрологічних умов.

Проте спостерігається значне зростання ВДЕ. Частка відновлюваної генерації збільшився з 1,01% у 2015 році до 3,77% у 2019 році. Це пов'язано з інвестиційними програмами в сонячну енергетику і вітроелектростанції, активним залученням приватного капіталу та механізмів стимулювання державної підтримки. 2020 рік, який збігся з глобальною пандемією COVID-19, став переломним момент у розвитку енергетики. Загальне українське виробництво електроенергії зменшилось до 148,9 млрд кВт/год. Зниження попиту з боку промисловості та транспорту призвело до зниження в навантаженні на генеруючі потужності. Це відбилося і на структурі генерації.

Частка АЕС у 2020 році знизилася до 51,17%, а частка ВДЕ зросла до 7,32%. Зростання відновлюваних джерел в умовах кризи свідчить про інерційність інвестиційних проєктів в СЕС та вітрові електростанції (ВЕС), запущені в попередні роки та накопичений потенціал цього сектора.

У 2021 році зафіксовано відновлення показників генерації до 156,6 млрд кВт/год. Збільшення обсягів виробництва пов'язане з поживавленням господарської діяльності, частковим відновленням промислового виробництва та адаптація енергетичного сектору до постпандемічного періоду.

Частка атомної генерації зростає до 55,04%, а ВДЕ – до 7,98%. З 2022 року українська енергетика працює в екстремальних умовах.

За даними Держстату, виробництво електроенергії скоротилося до 113,5 млрд кВт-год у 2022 році та до 105,8 млрд кВт-год у 2023 році. Це найнижчі показники для весь період, що розглядається.

Основними причинами падіння виробництва електроенергії у 2022–2023 роках стали руйнування енергетичної інфраструктури внаслідок ракетних ударів російських військ, окупація Запорізької АЕС, втрати значної частини теплової генерації та зменшення у промисловому споживанні. В результаті енергосистема країни була змушена працювати в режимі дефіциту потужностей. У структурному відношенні в ці роки спостерігається зменшення частки ТЕС

(до 27–29%) та збільшення ролі ГЕС і ГАЕС (до 11,81% у 2023 р.). Це вказує на використання ГАЕС для балансування енергосистеми в умовах дефіциту потужності базового навантаження. Частка відновлюваних джерел у цей період досягає 8 – 10 %, незважаючи на значні ризики, пов'язані з пошкодженням об'єктів відновлюваної енергетики. Це є пояснюється як географічною диверсифікацією розташування станцій, так і відносною швидке відновлення деяких сонячних електростанцій. За оцінками, обсяг виробництва електроенергії у 2024 році становив близько 100 мільярдів кВт/год. Це свідчить про подальше скорочення генерації порівняно з 2023 роком пов'язано з масштабним знищенням генеруючих потужностей через удари росії по енергетичній інфраструктурі. Структура генерації у 2024 році характеризується зростанням у частці атомної енергетики до 53% та зменшення частки теплової генерації до 29,87%. Це пов'язано як з виведенням з експлуатації значної частини теплових, так і з теплоелектростанцій та відносною стабільністю АЕС (за винятком окупована Запорізька АЕС). Частка гідроенергетики у 2024 році становила близько 6,13%, що менше ніж у 2023 р. Така динаміка пояснюється руйнуванням гідроінфраструктури, наслідки вибуху на Каховській ГЕС, обмеження використання води ресурси. Водночас ВДЕ досягають частки близько 11%, що підтверджує довгостроковість тенденція збільшення потужностей у цьому секторі. Важливою особливістю 2024 року стала Україна рекордний імпорт електроенергії приблизно 4,44 млрд. кВт/год. Це найбільший імпорт показник принаймні через 11 років [66,67]. Компенсатором дефіциту є імпорт електроенергії внутрішньої генерації, особливо в періоди пікового споживання.

Підсумовуючи результати аналізу, слід зазначити, що з 2009–2024 рр.

Україна зазнала значного скорочення загального виробництва електроенергії — практично вдвічі більше пікових значень 2012 р. Водночас зазнала змін структура генерації значні перетворення шляхом зменшення ролі ТЕС і підвищення значення ядерної енергії та відновлюваних джерел. Збільшення частки ВДЕ є стратегічним трендом що відповідає європейському курсу на декарбонізацію та енергетичну безпеку. Ядерній енергії зберігає

статус основного джерела генерації, водночас роль ТЕС залежить від ситуації з безпекою, стану інфраструктури та наявності палива.

Таким чином, динаміка виробництва електроенергії в Україні за 2009–2024 рр. відображає а поєднання економічних, технологічних і факторів безпеки. Це демонструє високу вразливість енергосистеми до зовнішніх шоків і, водночас, її здатність до адаптуватися до кризових умов, використовуючи потенціал атомної, гідроенергетики та відновлюваних джерел джерела. Аналіз динаміки структури енергогенерації України від 2009–2024 рр. дозволили охарактеризувати розвиток його виробництва електроенергії:

1) 2009–2024: «ядром» енергетичної системи є ядерна генерація як базове навантаження, тоді як теплові (вугільна і газова) і гідроелектростанції грали роль маневру для покриття піків, а швидкий розвиток ВДЕ почався лише з кінця 2010-х років;

2) 2009–2013: «класична» модель довоєнних потрясінь. Профіль періоду характеризується відносно інерційною системою з домінуванням АЕС і теплової генерації, гідроенергетика як помітний, але менший сегмент, і відновлювані джерела енергії критично мала частка в структурі;

3) 2014–2016: перший великий структурний злам у системі виробництва електроенергії, спричинений гібридним вторгненням Росії. Профіль періоду характеризується скороченням у виробництві та споживанні через економічний спад і обмежений доступ до деякі активи та вугільна база та збільшення вартості керованих та стійких джерела генерації;

4) 2017–2021: стрімке розширення відновлюваної енергетики та «реструктуризація» структури;

Профіль періоду характеризується значним зростанням встановлених потужності сонячних і вітрових електростанцій, тоді як атомна енергетика зберігає роль «ядра» виробничої структури;

5) 2022–2023: повномасштабне вторгнення, активні військові дії. Профіль періоду визначається падінням виробництва, збереженням високої частки АЕС, скороченням виробництва гідроенергії через руйнування ГЕС, критичний вплив пошкодження мереж і установок на виробництво та споживання електроенергії,

збільшення вимушеного імпорту електроенергії та збільшення кількості аварійних режимів генеруючих потужностей;

6) 2024: ескалація впливу на генерацію та мережу, імпорт та стійкість. Профіль період характеризувався інтенсивним пошкодженням тепло- та гідроінфраструктури, збільшенням потреби в запасних частинах та ремонті відповідних об'єктів енергетики та зростаючою роллю імпорту електроенергії з європейських країн у години пікового навантаження на мережу. Цей рік ознаменувався акцентом на децентралізацію дистрибуції та генерування електроенергії та створення накопичувальних хабів як інструментів балансування в умовах ризику пошкодження генеруючих потужностей і мереж. У цьому контексті не варто розглядати події в українській енергетиці 2024 року лише як черговий етап ескалації військових ризиків, а як критичний стрес-тест економічної та операційної стійкості української енергосистеми в умовах цільових страйків на об'єктах генерації та передачі. Масштабні пошкодження термічної і гідроінфраструктура трансформувала структуру витрат в енергетичному секторі, що призвело до збільшення потреби в аварійних ремонтах, імпорті обладнання та залученні збалансування ресурсів, що має прямий економічний вимір і транскордонні наслідки для суміжних енергосистем Європи. Посилення залежності від імпорту електроенергії з Європейські країни в години пік перенесли наслідки страйків.

Структура з високою питомою вагою низьковуглецевого базового навантаження створила технічні та системні передумови для інтеграції з ENTSO-E [69], що забезпечує стабільність частоти мережі (50 Гц), прогнозованість базового навантаження покоління, а також здатність балансувати в разі структурних і військових потрясінь.

У рамках підготовки до об'єднання з ENTSO-E, українською енергосистемою, яка історично була синхронізована з енергосистемами росії та Білорусі 24.02.2022 переведено на ізолюваний режим роботи 21 добу — сім разів довше, ніж спочатку планувалося. Ключовим аргументом стали результати ізолюваної операції за прискорену синхронізацію, яка відбулася на рік раніше терміну. У червні 2022 року Україна почала експортувати електроенергію до

ЄС, що продемонструвала технічна сумісність енергосистем і наявність експортного потенціалу навіть у воєнний час.

Відбулося поступове збільшення обсягів експорту до Румунії, Словаччини, Польщі та Молдови стало можливим завдяки виробничій структурі, де ядерна генерація забезпечувалась стабільною потужністю базового навантаження, доповнена гідро та відновлюваною енергією. Восени 2022 р. масові удари по критичній інфраструктурі призвели до тимчасового припинення експорту та переорієнтація всіх генеруючих потужностей на внутрішні потреби. Цей етап продемонстрував вразливість теплової генерації та стратегічне значення диверсифікованої генерації структура для енергетичної стійкості. Після технічної синхронізації логічним кроком було створення інституційної та ринкової умови інтеграції українського та європейського енергетичних ринків. Рішення Енергетичного Співтовариства, включаючи нормативні акти та Дорожню карту інтеграції, зіграли важливу роль. Структурні зміни у виробництві електроенергії за 2009–2024 рр продемонстрували адаптацію до європейських стандартів та формування профілю покоління сумісний із цілями декарбонізації та підвищення стійкості європейських систем перед лицем зростаючих ризиків безпеки.

30 червня 2022 року відбулися перші експортні операції з України до ЄС місце після синхронізації з ENTSO-E. За результатами щомісячного моніторингу за ENTSO-E, обсяги експорту поступово зростали. Станом на 30 липня 2022 року загальний обсяг обсягів поставок зріс у 2,5 рази порівняно з початковими показниками: до Румунії та Словаччини по 125 МВт кожна, до Польщі – близько 210 МВт, до Молдови – близько 200 МВт.

Синхронізація сприяла зміцненню енергетичної безпеки України та Європи, диверсифікація джерел і зменшення залежності від російських енергоносіїв. Експорт був призупинено 11 жовтня 2022 року після масштабного удару по енергетичній інфраструктурі України, яка продемонструвала необхідність оперативного управління ресурсами та встановлення пріоритетів побутові потреби. За відсутності масштабних руйнувань сумарний потенціал України перевищує внутрішній споживання, що створює передумови для

перетворення енергетичної системи в модель активного учасника європейських енергетичних та цифрових ринків. При цьому одним із перспективних напрямів післявоєнної реконструкції є розгортання потужних центрів обробки даних та інфраструктури для ШІ, що дозволяє ефективно використовувати надлишки електроенергії, створюючи додану вартість у високотехнологічних секторах та інтегруючи Україну в глобальну цифрові ланцюги [70]. ЄС уже звернувся до цифровізації енергетичних систем у політиці пріоритети, відзначаючи цінність інтеграції ІТ-інфраструктури для стабільності електропостачання оптимізація виробництва, споживання та використання відновлюваних джерел [71].

Теоретичні та емпіричні дослідження підкреслюють важливість диверсифікації енергетики джерел та зменшення залежності від зовнішніх постачальників як ключовий аспект енергетики ЄС безпеки [72,73]. Таким чином, на основі стратегічного розміщення енергоємних цифрових об'єктів на виробництво надлишку в Україні може не тільки підтримувати внутрішній економічний розвиток але також зміцнити енергетичну співпрацю з європейськими партнерами та зменшити загальну енергію залежність від нестабільних зовнішніх джерел. Реалізація цього потенціалу безпосередньо залежить від здатності енергосистеми зберігати функціональну стабільність протягом повного масштабу вторгнення та руйнування критичної інфраструктури, що робить міжнародна допомога і координація є невід'ємною частиною перемоги та інтеграції України в європейський енергетичний простір.

З перших днів російського вторгнення в Україну надійшла міжнародна допомога було ключовим фактором забезпечення функціональної стабільності національної енергетичної системи росії перед обличчям системного руйнування об'єктів критичної енергетичної інфраструктури. Масивний ракетні удари та удари безпілотників по генеруючим, мережевим і розподільчим об'єктам не призвели тільки до значних прямих економічних втрат, але також створив значні системні ризики, включаючи перебої з постачанням електроенергії, підвищення волатильності цін і потенційні транскордонні побічні ефекти для взаємопов'язаного європейського енергетичного ринку. У цьому сенсі Україна фактично стала «живою лабораторією» для перевірки

стійкості енергетичної системи в умовах високих загроз безпеки, досвід яких має практичне значення для країни Європи.

Інституційна відповідь України, координована Міненерго, була спрямована на те формування оперативних механізмів міжнародної технічної та матеріальної підтримки в порядку мінімізувати час простою та запобігти каскадним збоям в енергосистемі. Централізований механізм збору, пріоритезації та обробки потреб енергетичних компаній був запроваджено, що дозволило ефективно спрямувати міжнародну допомогу для відновлення критичних об'єктів. Для європейських країн цей досвід є показовим з точки зору важливості швидкої інституційної координації, інформаційної взаємодії і чіткі протоколи реагування на надзвичайні ситуації.

Суттєвим елементом підвищення стійкості енергетики стало створення Фонду енергетичної підтримки України у квітні 2022 р. за участю Енергетичного Співтовариства та Європейської комісії. Фонд запровадив гнучкий фінансовий режим інструмент, який забезпечив оперативну закупівлю необхідного спеціалізованого обладнання для відновлення зруйнованої інфраструктури у випадках, коли гуманітарні механізми доведені недостатні. Шляхом акумулювання внесків країн ЄС, міжнародних організацій та приватних компаній, Фонд значно скоротив тривалість аварійних відключень і пом'якшував економічні наслідки страйків. Для європейських країн така модель може слугувати прототипом превентивних фінансових механізмів реагування на масштабні інфраструктурні потрясіння.

На стратегічному рівні міжнародна допомога також координувалася через інститути політичного діалогу на високому рівні, включаючи участь міністрів енергетики країн країни-партнери, Енергетичне співтовариство та Міжнародне енергетичне агентство. Це багаторівневий формат управління сприяв підвищенню узгодженості рішень, зміцненню регіональної солідарності та розбудові колективного потенціалу для протидії системній енергії ризику [2,8,9,62,68]. Український досвід яскраво демонструє, що зрив в функціонуванні енергосистеми однієї країни можна швидко перевести на загальноєвропейську ризику через інтеграцію ринків і мереж.

У контексті підвищення стійкості особливу увагу було приділено залученню європейського приватного сектору та промислових кластерів до відновлення енергетичної інфраструктури України. За підтримки інституцій ЄС створено платформи міжгалузевої співпраці [2,9,28,61,72,73], що сприяло налагодженню зв'язків з виробниками та постачальниками енергетичного обладнання. Такий підхід не тільки розширив межі міжнародної допомоги, а також окреслив нові підходи до посилення стійкості ланцюгів поставок, що особливо актуально для європейських країн в умовах зростання геополітична невизначеність. Загалом досвід України показує, що стійкість енергосистеми в обличчя вторгнення визначається не лише фізичною потужністю інфраструктури а також інституційною гнучкістю, ефективною міжнародною координацією та швидким доступом на фінансові та технічні ресурси. Для країн ЄС український кейс є джерелом емпіричних даних щодо економічних втрат від руйнування критичної енергетичної інфраструктури і масштаб можливих транскордонних ризиків поширення, які слід брати до уваги при розробці сучасних стратегій енергетичної безпеки та підвищення стійкості області [74].

На основі аналізу річних звітів ENTSO-E за 2022–2024 рр., які містять дані на фізичних міждержавних перетоках електроенергії можна виділити стабільне коло України основних партнерів у сфері імпорту та експорту електроенергії після синхронізації з енергетична система континентальної Європи. Протягом досліджуваного періоду ключові країни імпорту електроенергії в Україну здійснювалися переважно через Словаччину, Польщу та Угорщину які значні обсяги поставок здійснено для покриття дефіциту генерації збалансувати енергосистему в умовах пошкодження інфраструктури, пов'язаного з війною; також було зафіксовано додаткові імпорتنі потоки через Румунію, зокрема протягом певних пікові періоди. Водночас основними реципієнтами експорту української електроенергії з 2022–2024 були Молдова та Румунія, що відображає обидві історичну інтеграцію енергосистеми та стратегічна роль України в забезпеченні регіональної стабільності електроенергетики постачання. В окремі періоди експорт здійснювався також до Польщі та Словаччини [52–54].

Загалом структура країн-партнерів у сфері транскордонної торгівлі електроенергією демонструє зростаючу взаємозалежність енергетичних систем України та росії та країн Центральної та Східної Європи, а також перетворення зовнішніх електричних потоків як важливого інструменту підтримки стабільності енергетичної системи в контексті тривалої російсько-української війни.

Узагальнено динаміку імпорту, експорту та сальдо зовнішньої торгівлі електроенергією України за 2022–2024 рр. на основі відповідного ENTSO-E звіти [52–54] (табл. 4). Це дозволяє оцінити зміну ролі України в регіональному потоки електроенергії та пов'язані з ними транскордонні ризики.

Таблиця 4. Динаміка імпорту, експорту та сальдо зовнішньої торгівлі України 2022–2024 рр.

Indicator	2022	2023	2024	Absolute Change 23/22	Absolute Change 24/23	Growth Rate 23/22, %	Growth Rate 24/23, %	Rate of Increase (Decrease) 23/22, %	Rate of Increase (Decrease) 24/23, %
Electricity imports, billion kWh	4.05	4.62	7.81	0.57	3.19	114.11	168.98	14.11	68.98
Electricity exports, billion kWh	6.06	4.08	3.65	–1.98	–0.43	67.30	89.50	–32.70	–10.50
Trade balance (exports–imports), billion kWh	2.01	–0.54	–4.16	–2.55	–3.61	–26.90	768.02	–126.90	668.02

Джерело: аналіз авторів на основі [52–54].

Таблиця 4 демонструє різку зміну ролі України в транскордонній торгівлі електроенергією з 2022–2024 років, що безпосередньо відображає вплив страйків на критичну енергетичну інфраструктуру та обмеження відновлюваного потенціалу енергосистеми. У 2022 році позитив баланс зовнішньої торгівлі електроенергією вказував на збереження адаптивної стабільності системи навіть на початковому етапі повномасштабного вторгнення і дозволив Україні здійснити функції регіонального постачальника електроенергії. Однак у 2023 році спостерігається перелом: скорочення експорту на фоні збільшення імпорту призвело до дефіциту торговельного

балансу, що відображає перехід до кризової моделі функціонування з підвищеною залежністю від зовнішньої підтримки.

Особливо знаковим є 2024 рік, коли стрімко зростає імпорт електроенергії поєднувалася з подальшим падінням експорту, що призвело до різкого погіршення в торговий баланс. Така динаміка корелює з ескалацією масштабів руйнувань генеруючих потужностей і магістральних мереж через систематичні загрози ракет і безпілотників, що обмежувало можливості внутрішнього виробництва та експортного маневру. При цьому час прискорене зростання імпорту відображає роль європейського енергетичного простору як а критичний буфер стабільності для України, але створює ризики поширення для країн-партнерів перерозподіл потужності та навантаження на регіональні ринки електроенергії. Найскладніший рік для енергосистеми України з початку повномасштабного запуску вторгнення було 2024 року, оскільки 13 масованих ударів по критичній енергетичній інфраструктурі, включно з балістичними ракетами і касетними боєприпасами призвело до втрати приблизно 10 ГВт генерації потужності. Незважаючи на це, завдяки безпрецедентній ремонтній кампанії, проведеній під постійні обстріли, а також міжнародній підтримці понад 1 мільярд євро та гуманітарна допомога допомоги з 36 країн, енергосистема зберегла свою функціональну цілісність і стабільність живлення. Важливими факторами стійкості став активний розвиток розподілених генерації (підключено 967 МВт, з них 835 МВт у 2024 році), підготовка всіх дев'яти атомні енергоблоки, які забезпечували близько 60% виробництва електроенергії, а також поглиблення інтеграції з ENTSO-E, включаючи збільшення імпортової потужності до 2,1 ГВт.

У стратегічній перспективі затвердження Національного енергетичного та кліматичного плану доки 2030 рік, запуск фінансових програм для розширення майже 430 МВт нових потужностей і анонс проектів створення малих модульних реакторів лягли в основу для підвищення енергетичної безпеки та поступового відновлення експортного потенціалу України [75].

Загалом динаміка, наведена в табл. 4, підтверджує, що зовнішня торгівля електроенергією є чутливим показником стійкості енергетичної системи: від

відносної стабільності і експортні можливості до режиму дефіциту та зростання транскордонної залежності. Поглиблення від'ємного торгового балансу у 2024 році свідчить про перехід від короткострокової адаптації до структурні виклики відновлення, що посилює взаємозалежність енергетичної безпеки України та ЄС і наголошує на необхідності скоординованих регіональних підходів до захисту і відновлення критичної енергетичної інфраструктури.

У 2025 році ці процеси відбувалися на тлі подальшого зростання обсягів руйнувань об'єктів генерації та магістральних електромереж, спричинених систематичними ракетними та безпілотними удари по енергетичній інфраструктурі України. Збільшення фізичних пошкоджень призвели до зниження надійності енергосистеми і зростили необхідність оперативного балансування за рахунок імпорту електроенергії. При цьому відновлення індивідуальних міждержавних потоків і поступове розширення дозволеної пропускної здатності потужності створили передумови для часткового відновлення експортних операцій.

У таких умовах транскордонна торгівля електроенергією набула особливого значення як а засіб для пом'якшення наслідків руйнування та запобігання ефекту переливу шоку для енергосистем європейських країн.

Протягом жовтня 2025 року українські компанії імпортували 360 ГВт-год електроенергії з п'яти сусідніх країн і експортував 91 ГВт-год. Майже половина обороту припала на Угорщина, звідки імпортувався 51% і експортувався 43% ресурсу. Дякуючи завершенню ремонту на лінії Велике Капушани-Мукачево, прикордонна торгівля зі Словаччиною було відновлено наприкінці жовтня. Максимально допустима потужність для експорту електроенергії з України та Молдови до країн ЄС становив 0,9 ГВт. Оскільки 1 серпня за угодою між шістьма операторами систем передачі, що входять до Східноєвропейський регіон розрахунку потужності (EE CCR), він переглядався щомісяця.

Планується збільшити експортну потужність до 1,1 ГВт до кінця 2026 року [76].

На початку 2025 року Україна зіткнулася з інтенсивними хвилями ракетних і безпілотних ударів по критичних енергетичної інфраструктури, що

включає сотні ракет і безпілотників, що спричиняє широке розповсюдження пошкодження електромереж, часткове відключення електроенергії, руйнування об'єктів генерації та розподілу в багатьох регіонах країни, зокрема в столиці, східних і південних регіони — останні страйки залишають без світла значну частину населення, тепла та води в надзвичайно холодних зимових умовах. Такі систематичні страйки не тільки підвищують енергетичну вразливість України, але також мають транскордонні наслідки для енергетичної безпеки Європи, оскільки вони збільшують потребу в імпорті та резервному споживанні електроенергії потужності, підвищення цін на енергоносії та посилення тиску на регіональні ринки електроенергії та побічні ефекти російського вторгнення на енергетичні системи сусідніх держав [77].

Динаміка загального виробництва електроенергії, показників на душу населення та чисельності населення в Україні за 2009–2024 рр. представлено на рисунку 1.

Така динаміка свідчить про яскраво виражену довготривалу трансформацію української електроенергетики у зв'язку з демографічними змінами. З 2009–2013 рр. етап спостерігалася відносна стабільність і зростання: загального виробництва електроенергії та на душу населення виробництво зросло на фоні повільного скорочення чисельності населення, що відображало в промислова структура економіки та стабільний внутрішній попит. Період 2014–2016 рр став переломним моментом, коли відбулося одночасне різке зменшення чисельності населення і спаду виробництві електроенергії призвело до значного зниження генерації як в абсолютному вираженні і на душу населення, що корелює з початком російського вторгнення та втратою частини промислових потужностей і територій.

З 2017–2021 рр. оформилася фаза часткової адаптації: незважаючи на подальше скорочення чисельності населення, виробництво електроенергії стабілізувалося, а виробництво на душу населення виявилось помірним.

Коливання з тенденцією до відновлення у 2021 р. Це свідчить про структурну перебудову енергетичної системи та зниження енергоємності економіки. У той же час, 2022–2024 роки характеризувались різким розривом із

попередніми трендами: на тлі повномасштабної війни, масових ударів по критичній енергетичній інфраструктурі та прискореного демографічного спаду відбулося безпрецедентне скорочення загального виробництва електроенергії, що призвело до різкого скорочення покоління на душу населення, швидше ніж скорочення населення.

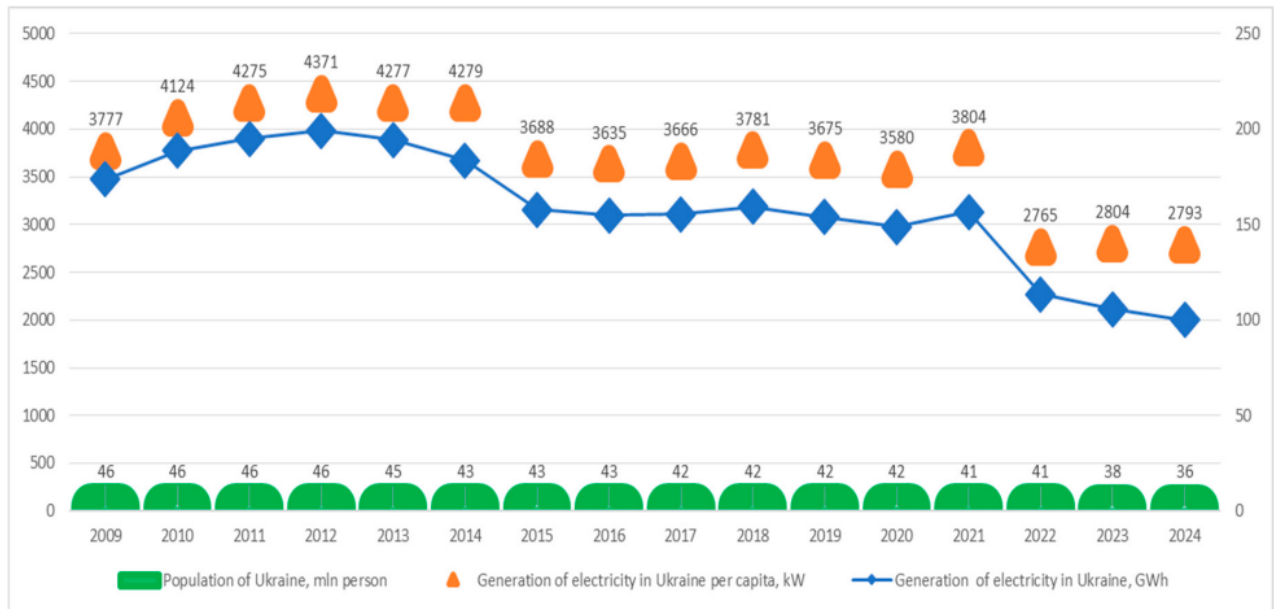


Рисунок 1. Динаміка виробництва електроенергії, чисельності населення та виробництва електроенергії в Україні на душу населення за 2009–2024 рр. (за даними [78–80]).

Загалом спостерігається стабільна картина: у перспективі демографічний спад на сама по собі не компенсує втрати виробничого потенціалу енергетичної системи, а ключовим фактором падіння виробництва електроенергії є військові удари та руйнування інфраструктури, які формують структурний злам у динаміці показників після 2022 р. Це підтверджує, що виробництво електроенергії на душу населення є чутливим показником стійкості країни економіка та енергетична система в умовах тривалих криз і військових загроз.

Динаміка загального обсягу виробництва електроенергії в країнах, з якими

Україна здійснює активні експортно-імпортні операції в рамках ENTSO-E (Польща, Румунія, Угорщина, Словаччина, Молдова), показники на душу населення та населення з 2009–2024 рр. представлено на рисунках 2–6.

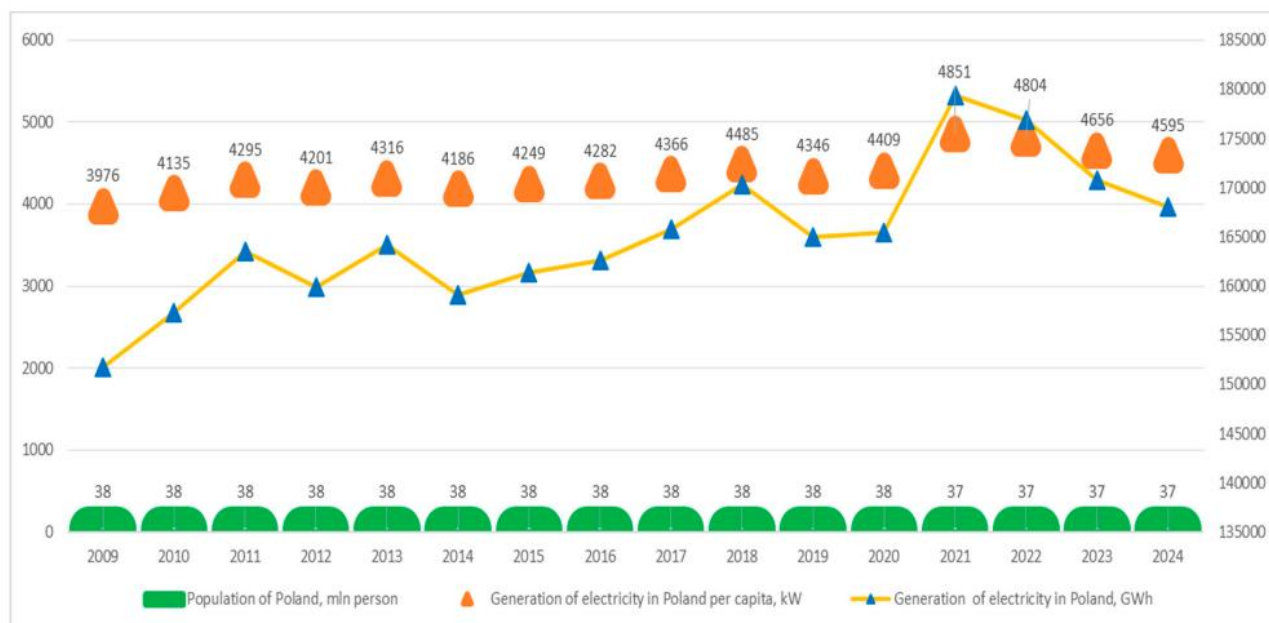


Рисунок 2. Динаміка виробництва електроенергії, чисельності населення та виробництва електроенергії на душу населення в

Польща з 2009–2024 рр. (власна розробка авторів за даними [81,82]).

У 2009–2024 роках Польща демонструє високий і відносно стабільний рівень електроенергії виробництва, яке зросло з 151,7 до 168,0 ТВт*год, незважаючи на помірне скорочення населення. Показник генерації на душу населення мав виражену тенденцію до зростання до 2021 рік з подальшою корекцією 2022–2024 років, яка відображає вплив енергетичної кризи і структурні зміни в генерації. Як найбільша енергосистема серед розглянутих

Польща є ключовим регіональним центром у рамках ENTSO-E та має потенціал балансуєчого партнера для України, особливо в періоди дефіциту генерації (рис. 2).

Румунія характеризується помірними, але стабільними рівнями генерації, коливаючись між 55 і 64 ТВт-год, з явним зниженням після 2021 року.

Виробництво електроенергії на душу населення зросло до 2018–2021 рр., після чого різко знизився через енергетичні та макроекономічні шоки.

Враховуючи географічну близькість і наявність міждержавних потоків, Румунія є важливим пунктом як для імпорту та експорту електроенергії для України, так і для коливань при його генерації безпосередньо впливають на регіональний енергетичний баланс (рис. 3). Цей спад виробництва електроенергії в Румунії обґрунтовується конвергенцією регіональних макроекономічних зовнішніх ефектів і запланованими структурними зрушеннями в енергетичному секторі. Поки не напряду постраждала від військових ударів, румунська енергосистема служить каналом передачі для волатильності та цінових шоків, спричинених конфліктом в Україні, що призвело до реконфігурації своїх торгових потоків у мережі ENTSO-E. Крім того, цей спад узгоджується з довгостроковими зобов'язаннями Румунії щодо Європейської зеленої угоди, що вимагає поетапне виведення з експлуатації застарілих вугільних потужностей для відповідності екологічним директивам ЄС. Таким чином, спостережувана динаміка виробництва відображає поєднання непрямих «побічний ефект» регіональної кризи та стратегічного переходу до декарбонізації енергетичної моделі, а не прямої шкоди інфраструктурі.

В Угорщині спостерігається довгострокова тенденція до зменшення загального виробництва електроенергії 36,0 до 32,4 ТВт*год, що супроводжується постійним зниженням чисельності населення. Подушне покоління після піку 2012–2013 рр. поступово зменшується, вказуючи на обмежений внутрішній виробничі резерви. У рамках ENTSO-E це визначає головним чином роль Угорщини як транзитного та імпортного партнера, що посилює його важливість у забезпеченні гнучкості електропостачання України в умовах кризи (рис. 4).

Словаччина має найвищий рівень виробництва електроенергії на душу населення серед аналізованих країн, що пояснюється поєднанням відносно невеликого населення розмір і потужна генераційна база. Незважаючи на поступове зниження загального обсягу виробництва з 27,3 до 25,9 ТВт-год, показник на душу населення залишається стабільно високим. Це визначає

особливо Словаччина як один із найбільш технічно спроможних партнерів України в ENTSO-E для екстреного імпорту та балансування системи (рис. 5).

Для Молдови характерні низькі абсолютні обсяги генерації (близько 5,5–6,2 ТВт·год), які майже не змінилися протягом періоду, тоді як населення було значно зменшується. У результаті виробництво електроенергії на душу населення демонструє помірне значення приріст, що є наслідком демографічного чинника, а не розширенням потенціал генерації. У контексті ENTSO-E Молдова є структурно залежною партнером, тоді як Україна традиційно відігравала роль важливого постачальника та стабілізатора його енергетичної системи (рис. 6).

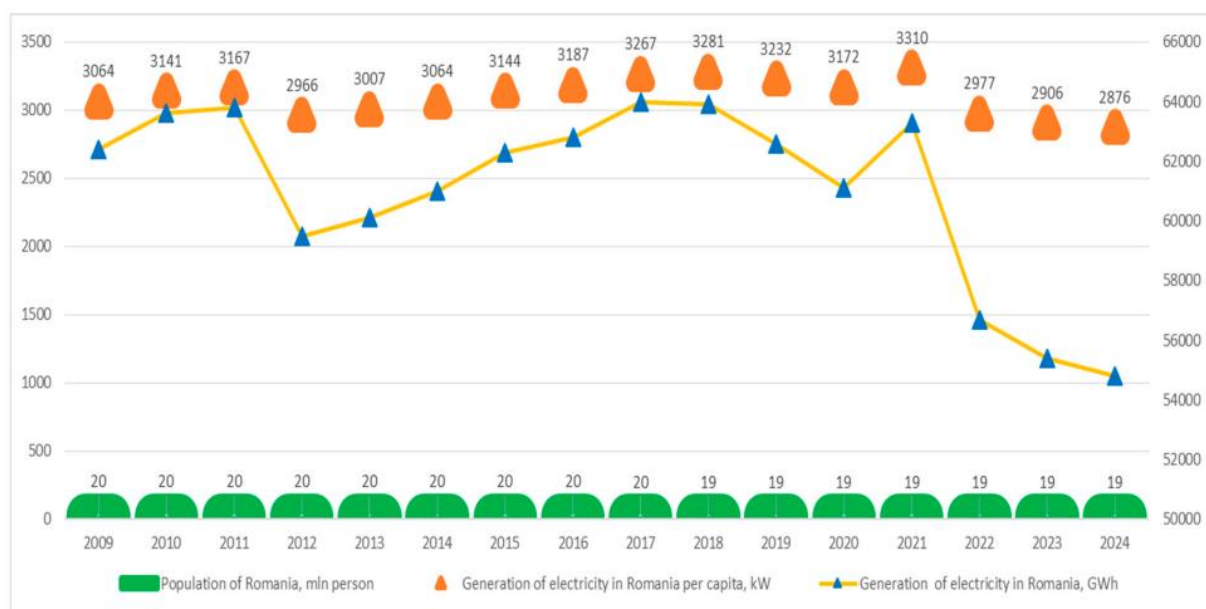


Рисунок 3. Динаміка виробництва електроенергії, населення та виробництва електроенергії в Румунії з 2009–2024 рр. (за даними [81,82]).



Рисунок 4. Динаміка виробництва електроенергії, населення та виробництва електроенергії в Угорщині з 2009–2024 рр. (власна розробка авторів за даними [81,82]).

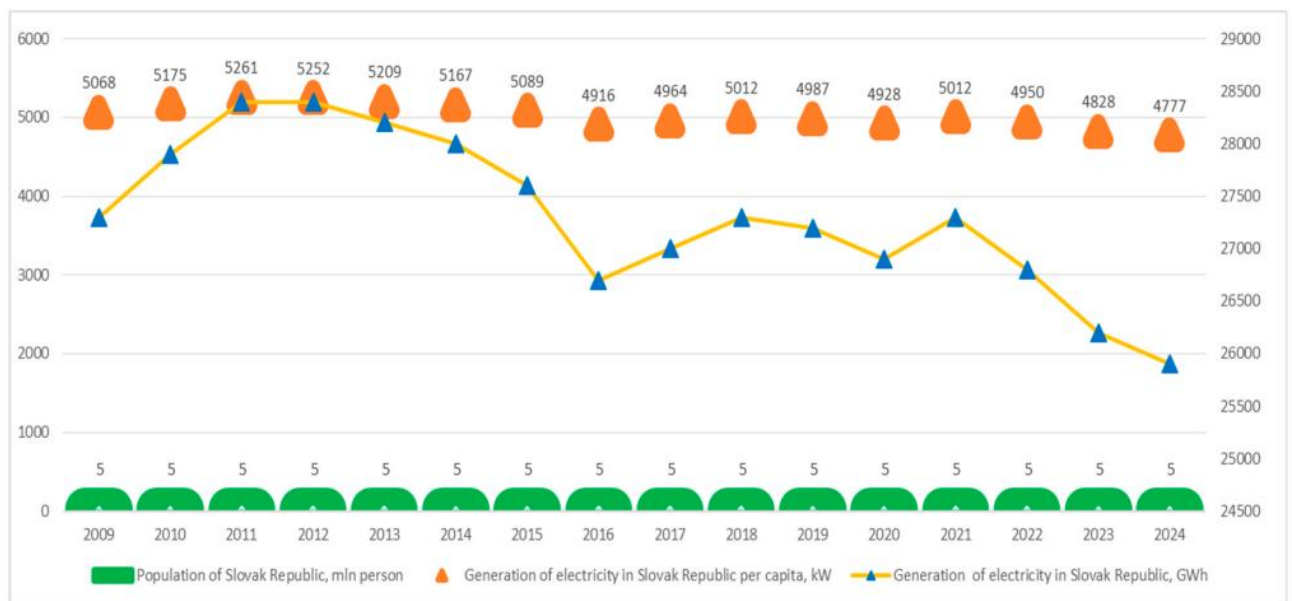


Рисунок 5. Динаміка виробництва електроенергії, населення та виробництва електроенергії в Словаччині з 2009–2024 рр. (власна розробка авторів за даними [81,82]).



Рисунок 6. Динаміка виробництва електроенергії, населення та виробництва електроенергії в Молдові з 2009–2024 рр. (за даними [81,82]).

Порівняльний аналіз п'яти країн світу про значну асиметрію генераційних потужностей і демографічного масштабу, що змінює різні ролі України. партнерами в рамках ENTSO-E. Польща та Румунія формують головний регіональний потенціал генерації, тоді як Словаччина характеризується високою ефективністю генерації на душу населення і є критичною для балансування. З іншого боку, Угорщина та Молдова мають обмежені внутрішні ресурси і значною мірою залежать від транскордонних потоків.

У цьому контексті інтеграція України в ENTSO-E трансформує взаємодію з ці країни від двосторонньої торгівлі до багатовимірної системи взаємної стійкості, де зміна поколінь, демографічні тенденції та військові ризики в Україні впливають на енергетична безпека сусідніх держав. Тому динаміка виробництва електроенергії в країнах-партнерах має ключове значення для оцінки побічних ефектів і формування спільних механізми реагування на енергетичні шоки в регіоні ЄС–Україна.

З точки зору стійкості такі взаємозалежності вказують на стійкість Систему ENTSO-E не можна інтерпретувати в технічних або експлуатаційних термінах, але потрібно розуміти як довгострокову здатність підтримувати енергетичну безпеку, стабільність системи та справедливий доступ до

енергетичних ресурсів в умовах постійної геополітичної невизначеності. Таким чином, стала стає всеохоплюючою аналітичною структурою, яка інтегрує здатність до ризику та здатність до стійкості взаємопов'язаних енергетичних систем.

В умовах високої невизначеності, спричиненої військовими загрозами, структурними зруйнуваннями у генераційних і демографічних факторах, існує потреба в системному підході, здатному інтегрувати ймовірнісні характеристики поштовхів у результаті руйнування української енергосистеми від масованих ракетних і безпілотних ударів. Саме для цього Методом дослідження є те, що пропонується рамкова модель для оцінки ризиків переливу в контекст стійкості інтегрованої енергетичної системи ENTSO-E. Мета цього моделювання полягає в кількісній оцінці ймовірних ризиків переливу, зокрема їх впливу на енергію безпеки та стійкості європейських країн. Структура запропонованої побудови моделі включає обґрунтування типу моделі, інструментарій моделі, її практичне значення і компоненти моделі.

РОЗДІЛ 3. МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ СТІЙКОСТІ ЕНЕРГОСИСТЕМИ

3.1 Розробка математичної моделі для оцінки стійкості української енергосистеми

У цьому дослідженні стійкість операціоналізується через взаємодію між ризиком і компоненти стійкості в системі ENTSO-E. який, це тлумачиться як здатність взаємопов'язаних енергетичних систем підтримувати функціональну безперервність протягом тривалого часу незважаючи на періодичні зовнішні шоки, що вимагають формальної інтеграції ймовірного ризику оцінка та вимірювання системної стійкості.

Цей тип запропонованої аналітичної моделі передбачає оцінку системного ризику в контексті стійкості інтегрованої енергетичної системи ENTSO-E перед зовнішніми потрясіннями, яка належить до системно-аналітичних моделей оцінки. Він простий у використанні, адаптований до будь-яких зовнішніх сценаріїв і дозволяє комплексно оцінити ризики переливу в контекст стійкості.

У цю модель входять такі інструменти:

1. Моделювання ризику на основі продукту.
2. Сценарний підхід для ймовірності.
3. Зважений індекс впливу.
4. Інтегральні оцінки.

Щоб забезпечити кількісну точність і наукову відтворюваність, ми формалізували інтегральна модель ризику (IRM) для оцінки вторинних ефектів. Це математична основа перетворює концептуальні загрози в порівняльні числові показники шляхом розрахунку інтегральний ризик переливу (SR_i) для кожної аналізованої держави-члена ENTSO-E.

Перехід від якісної оцінки до структурованого кількісного підходу дозволяє для системної оцінки того, як зовнішні шоки поширюються через взаємопов'язані мережі.

Операціоналізуючи взаємодію між руйнівними військовими подіями та внутрішніми.

Структурні характеристики систем, що приймають енергію, модель передбачає строгий базою для порівнянь між країнами в умовах високої невизначеності. Відповідно, процедурна реалізація цієї методології дотримується структурованої послідовності щоб охопити як безпосередній вплив пошкодження інфраструктури, так і невід'ємну потужність національних систем для поглинання таких потрясінь. Математична формалізація інтеграла ризик поширення (SR_i) включає ряд етапів:

Етап 1. Цей ризик зазвичай розраховується за такою формулою:

$$SR_i = P \times V_i \times C_i,$$

де P означає ймовірність значного збою в українській енергетиці система, визначена за допомогою сценарного підходу: 0,30 (оптимістичний), 0,65 (базова лінія), і 0,85 (песимістичний). Базове значення $p = 0,65$ емпірично обґрунтовано в частота масових страйків, що спостерігалися з 2022 по 2025 рік

(у середньому більше одного великомасштабного напад на тиждень під час опалювального сезону) та історичні прецеденти, де до 50% генеруючі потужності тимчасово виведено з ладу.

V_i позначає ступінь структурної енергетичної залежності i -ї країни від України, розраховується як:

$$V_i = E_i / E_{toti},$$

де E_i — обсяг імпорту/експорту електроенергії з Україною; E_{toti} — загальна річна електроенергія виробництва.

C_i — індекс наслідків — розраховується як:

$$C_i = \alpha \times Econ_i + \beta \times Energy_i + \gamma \times Soc_i,$$

де $Econ_i$ — економічна чутливість (залежність ВВП від імпорту енергоносіїв); Енергетичний — технічний залежність (безальтернативність); Соціальні — соціальні наслідки (дефіцит електроенергії, нестабільність);

$\alpha + \beta + \gamma = 1$ — параметри, що визначаються аналітично залежно від пріоритетів.

Значення для α , β , γ були отримані шляхом поєднання експертної оцінки та статистичних даних від ENTSO-E, віддаючи перевагу технічній залежності (β) як головному рушію потенціалу каскадного збою.

Етап 2. Індекс стійкості (Res_i). Цей показник дозволяє оцінити енергію стійкість системи та розраховується шляхом інтеграції диверсифікації поставок, технологічної мережі гнучкості і здатність до відновлення системи:

$$Res_i = \delta_1 \times D_i + \delta_2 \times A_i + \delta_3 \times Rv_i$$

де Res_i – індекс стійкості i -ї країни;

D_i — диверсифікація джерел постачання;

A_i —технологічна гнучкість;

Rv_i —здатність до відновлення (час і ефективність перезапуску системи);

$\delta_1 + \delta_2 + \delta_3 = 1$ — параметри.

Методологія оцінки параметрів інтегрального ризику переливу (SR_i) модель передбачає процедуру нормалізації. Усі вхідні індикатори (V_i , C_i , Res_i) були нормалізовані до безрозмірного масштабу $[0; 1]$. Це забезпечує порівняння між різними наборами даних, такі як обсяги генерації (TWh) і соціально-економічні показники.

Таким чином, IRM має вигляд:

$$\begin{cases} SR_i = P \times V_i \times C_i, \\ R_i = \delta_1 \times D_i + \delta_2 \times A_i + \delta_3 \times Rv_i \end{cases}$$

Параметри в цій моделі є ваговими коефіцієнтами для кожного компонента та були отримані використовуючи комбінацію експертної оцінки, статистичних даних ENTSO-E та нормалізації кожного показника ризику за шкалою 0–1. Сукупна оцінка IRM забезпечує прозорість і відтворюваний рейтинг ризику поширення ефекту для кожної країни, що дозволяє політикам порівнювати рівні вразливості систематично.

За умови, що SR_i нормується в межах $[0; 1]$, така модель дозволяє оцінити потенціал стабільності системи. Ця модель відноситься до кількісної категорії впливу першого порядку і призначений для аналізу міжгалузевих систем, у тому числі енергетичних, економічних, соціальних області стабільності. Він використовує експертну параметризацію — типовий підхід для моделювання в висока невизначеність (наприклад, оборонно-енергетичний сектор).

Практичне значення запропонованого підходу полягає у його високій прикладній цінності для:

- аналітична оцінка ризиків міждержавних енергетичних відносин;
- виявлення вразливості країн до ударів по українській енергосистемі;

- оцінка потенційної стійкості та здатності до відновлення після кризових впливів.

Окрім загального аналітичного значення, запропонована модель може бути інтегрована в кількість прикладних сфер на стратегічному та політичному рівні. Його використання відкриває нові можливості для реалізації конкретних управлінських рішень за такими напрямками:

1. Енергетична безпека ENTSO-E шляхом визначення країн, вразливих до скорочення потоків з Україною, визначення пріоритетності заходів з енергетичної диверсифікації та оцінка ланцюга вплив військових подій на транскордонні ринки.

2. Політичне та стратегічне планування. Модель дозволяє будувати сценарії ризиків для політичних рішення щодо резервів підтримки інфраструктури та допомоги Україні.

3. Внутрішнє антикризове планування, яке надає можливість національним урядам використовувати його для розрахунку потреб у механізмах компенсації, визначення критичних регіонів секторів економіки та планування стратегічного імпорту.

У сценарії дослідження моделювання ймовірності (P), введення трьох сценаріїв подій, що відображають різні рівні геополітичної ескалації, виконано (табл. 5).

Таблиця 5. Сценарії геополітичної ескалації та їх імовірність

Scenario	Description	P (Probability of Strikes)	Calculation Logic
Optimistic	Reducing the intensity of strikes, stabilizing the frontline	0.30	Significant reduction in the number and effectiveness of strikes, subject to international pressure or de-escalation
Base	The situation remains at the level of 2023–2024	0.65	Corresponds to the average level of strikes for 2022–2024, taking into account regular strikes on critical infrastructure
Pessimistic	Escalation of the conflict, strikes on critical infrastructure	0.85	Massive strikes on main sub-stations, generating facilities, hydroelectric cascades, etc.; possible collapse of the power system

Оцінка ймовірності масштабних ударів по українській енергетичній Системі (P) є критичним елементом моделі ризику. Через відсутність у відкритому доступі офіційної статистики щодо кількості та наслідків страйків,

ми застосували сценарний підхід, який широко використовується в управлінні ризиками в умовах невизначеності. Як емпірична основа для оцінки частоти, зведена база перевірених повідомлень про масовані удари по енергетичної інфраструктури України на період 2022–2025 рр. [83–98], яка дозволило кількісно оцінити регулярність таких подій. Величина $p = 0,65$ формує базовий сценарій що був обраний на основі:

- регулярність страйків (в середньому частіше одного разу на тиждень в опалювальний період);
- ефективність окремих ударів, що призводять до тимчасових втрат генерації;
- історичні прецеденти: зима 2022–2023 років — вийшло з ладу до 50% генерації.

Була застосована наступна шкала ризику масованих ракетних ударів і ударів безпілотників:

- $<0,30$ —низька ймовірність;
- $0,30–0,70$ —середня ймовірність;
- $>0,70$ —дуже висока ймовірність.

Величина ризиків переливу для країн ENTSO-E, отримана на основі результатів застосування рамкової моделі для оцінки ризиків переливу в контексті стійкості інтегрованої енергетичної системи ENTSO-E, відображає значну диференціацію рівнів інтегрального ризику за базовим сценарієм з фіксованою ймовірністю системних ударів $p = 0,65$.

Найвищий рівень ризику зафіксовано для Молдови, де значення $SR_i = 0.023111$, який є на порядок вищим за відповідні показники інших країн і свідчить про критичну залежність від міждержавних потоків та обмежену внутрішню стійкість енергоносіїв системи. Значно нижчі, але ненульові, ризики спостерігаються для Словаччини ($SR_i = 0,001596$) та Угорщини ($SR_i = 0,000813$), що відображає їх помірну вразливість до збоїв у транскордонному енергетичному сполученні з Україною. Румунія демонструє ще нижчу інтегральний рівень ризику переливу ($SR_i = 0,000520$), а найменше значення характерне для Польщі ($SR_i = 0,000265$), що вказує на відносно високу диверсифікацію джерел енергії. і більша адаптивність до зовнішніх потрясінь.

Загалом отримані кількісні оцінки підтвердити асиметричний характер транскордонних ризиків у межах ENTSO-E та підкреслити ключова роль структурної залежності та національної стійкості енергетичних систем у формуванні інтегрального показника.

Аналіз впливу ризику поширення в країнах ENTSO-E показує значний відмінності у вразливості. Відповідно до рейтингу, створеного запропонованою системою, Молдова демонструє найвищий рівень вразливості, тоді як Польща демонструє найбільша стійкість. Румунія, Словаччина та Угорщина посідають проміжні позиції у рейтингу ризику, що відображає структурні та експлуатаційні відмінності в їх енергетичних системах.

Концептуальна логіка поширення енергетичного удару від України до інтеграції до Європейської електричної мережі та отримані рейтинги вразливостей, розраховані за допомогою IRM всебічно узагальнено на рисунку 7.

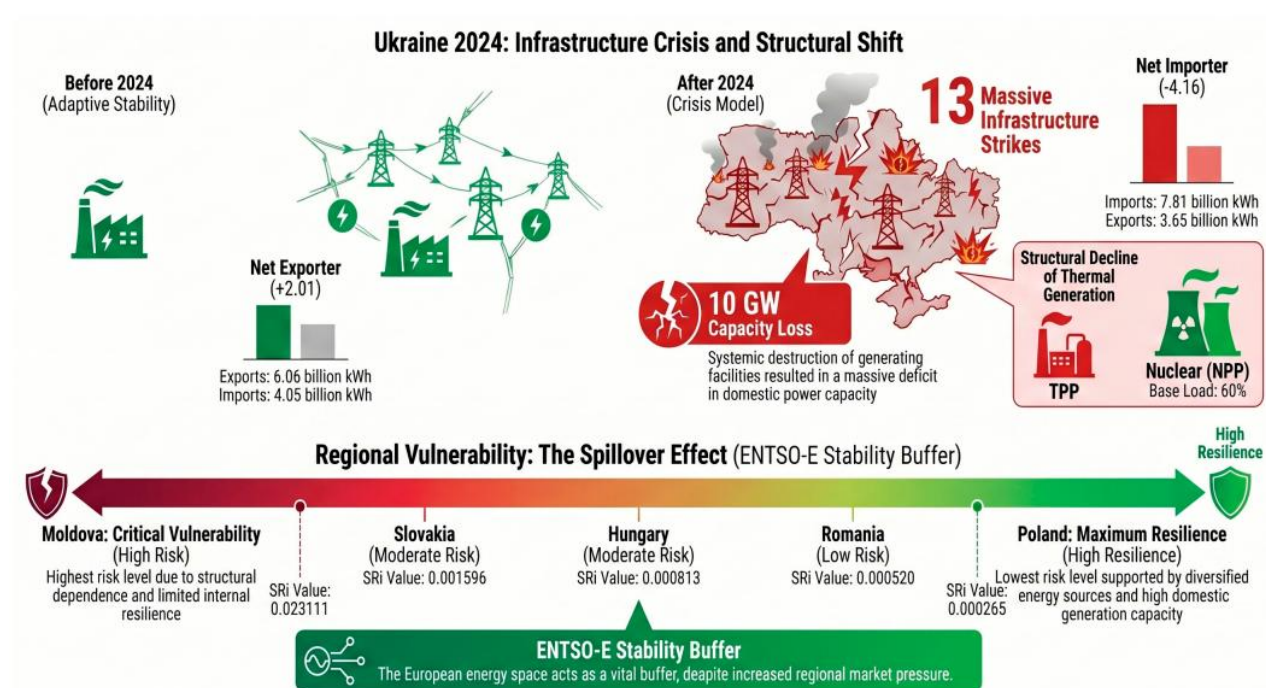


Рисунок 7. Концептуальна основа шкоди енергетичній інфраструктурі в Україні, транскордонне поширення канали поширення ризику та оцінка регіональної вразливості для сусідніх країн ENTSO-E.

Результати підкреслюють, що країни з обмеженою внутрішньою генеруючою потужністю та сильна залежність від транскордонних потоків електроенергії особливо чутливі до зовнішнього впливу удари. Навпаки, країни з диверсифікованими джерелами виробництва та вищим внутрішнім виробництвом демонструє більшу здатність поглинати та керувати збуреннями, що виникають від сусідніх енергосистем.

3.2 Обговорення результатів моделювання

Можна пояснити спостережувану асиметрію ризику переливу серед країн ENTSO-E до структурно-експлуатаційних факторів. Висока вразливість Молдови зумовлена насамперед його обмежене власне виробництво, залежність від імпорту електроенергії та потужні взаємозв'язки з Україною. Будь-який збій в українській інфраструктурі може мати прямий переклад у нестабільність поставок і коливання цін, підкреслюючи вплив Молдови на зовнішні впливи енергетичні удари.

Польща, навпаки, демонструє найвищу стійкість, виграючи від диверсифікації джерела енергії, значні внутрішні генеруючі потужності та міцна інтеграція всередині Європейський ринок електроенергії. Ці фактори дозволяють Польщі поглинати регіональні збурення ефективніше та підтримувати стабільність системи.

Румунія та Словаччина демонструють помірну вразливість. Диверсифіковане портфоліо генерації Румунії, включаючи атомну, гідро- та відновлювану енергію, забезпечує гнучкість і стійкість. Словаччина з меншим населенням, але відносно високим виробництвом електроенергії на душу населення може балансування системи підтримки в регіональній мережі. Проте обидві країни залишаються частково оголені через регіональні взаємозв'язки.

Угорщина демонструє помірний вплив. Його залежність від транскордонних потоків електроенергії підвищує гнучкість за звичайних умов, але підвищує чутливість до збоїв сусідніх систем, у тому числі України.

Загалом ризику поширення в інтегрованій системі ENTSO-E розподілені нерівномірно і залежать від таких факторів, як генеруюча потужність,

диверсифікація джерел енергії, ступінь транскордонної інтеграції та інституційної здатності реагувати на шоки.

З точки зору політики, ці висновки підкреслюють необхідність посилення регіонального розвитку механізми координації, інвестувати в гнучкість мережі, диверсифікувати джерела генерації та розробити спільні стратегії реагування на кризу. Це зменшить системний вплив локалізованого збоїв і підвищення регіональної енергетичної безпеки в умовах геополітичної нестабільності.

У контексті обговорення отриманих результатів доцільно порівняти їх з висновки попередніх досліджень, зокрема [12], в якому зосереджено увагу на аналіз сценаріїв нестабільності та ризиків для критичної енергетичної інфраструктури без прямого акцент на військових факторах. Автори підкреслюють роль інституційних, технологічних, організаційна та кібернетична вразливість, а також системна взаємозалежність енергії обладнання, що може призвести до каскадних збоїв. Результати, отримані в нашому дослідженні, такі в цілому відповідають цим підходам, але розширюють їх, демонструючи, що в умовах російсько-української війни ця вразливість посилюється зовнішніми військових впливів і набувають яскраво вираженого транскордонного характеру.

Емпіричний аналіз динаміки виробництва електроенергії, структури генерації та зовнішня торгівля електроенергією в Україні свідчить про руйнування енергетичної інфраструктури має системні наслідки, що виходять за межі національного рівня. Зафіксований перехід з України від балансу експорту до імпорту електроенергії у 2023–2024 роках, а також зростаюча залежність від транскордонних потоків в рамках ENTSO-E, підтверджують існування а канал передачі ризику до суміжних енергосистем.

Рамкова модель для оцінки ризиків переливу в контексті стійкості представленої в статті інтегрованої енергетичної системи ENTSO-E дозволяє інтерпретувати це призводить до ширшого системного контексту. На відміну від підходів, які вважають критичним інфраструктурні ризики переважно як внутрішня проблема окремої держави, запропонована модель фокусується на транскордонних наслідках, які виникають внаслідок фізичних ударів по

енергетичних об'єктах у інтегрована мережа. Це дозволяє оцінити не тільки масштаби прямих збитків, а й самих можливі наслідки для балансування, резервних потужностей і надійності роботи суміжні енергетичні системи.

Результати мають ширші наслідки для європейської енергетичної політики та управління ризиками в рамках ENTSO-E. Вони підтверджують, що захист і відновлення України енергетична інфраструктура є не лише національним завданням, а й важливим елементом європейського колективної енергетичної безпеки, оскільки війна проти української енергосистеми трансформується у фактор системної нестабільності інтегрованого європейського енергетичного простору.

Результати, отримані в цьому дослідженні, узгоджуються з попередніми дослідженнями що російсько-українська війна породила значні транскордонні енергетичні, фінансові, і макроекономічні побічні ефекти для Європи [28–39]. Зокрема, наші висновки підтверджують попередні висновки щодо зростаючого взаємозв'язку між енергетичною безпекою, волатильність цін і системні геополітичні ризики в європейському енергетичному просторі [9,29,34].

У той же час, на відміну від попередніх досліджень, які в основному вивчали окремі аспекти пошкодження інфраструктури, кіберстійкості або макроекономічної нестабільності [8,11–17], ця стаття розробляє інтегровану рамкову модель, яка поєднує ймовірність шоків, структурні уразливості та можливості відновлення для країн ENTSO-E. Такий підхід не дозволяє нам лише для концептуальної інтерпретації побічних ефектів, але також для кількісної оцінки асиметрії стійкості та транскордонного поширення ризику в умовах воєнного часу.

Нарешті, ці результати підкреслюють необхідність подальших досліджень. Кількісне уточнення використання детальних даних транскордонного потоку ENTSO-E, аналіз сценарію тривалого гібриду загроз, а оцінка цифрових інструментів управління ризиками покращить прогностні можливості рамки. Інтеграція військового, кібернетичного та ринкового аспектів у ризик поширення оцінка забезпечує комплексний підхід для

політиків та енергетичних аналітиків прагнучи підвищити регіональну стійкість в умовах тривалої геополітичної нестабільності.

ВИСНОВКИ

Дослідження підтвердило масовані російські ракетно-безпілотні удари по Україні критичної енергетичної інфраструктури в період з 24 лютого 2022 року по січень 2026 року є системним чинник дестабілізації не лише національної енергетичної системи, а й інтегрованої Європейський енергетичний простір ENTSO-E. Аналіз статистичної інформації показав суттєве скорочення загального виробництва електроенергії в Україні, що є не випадковим, а глибоким має системний характер і відображає широкомасштабні потрясіння в економіці та безпеці, спричинені війни. Водночас констатовано, що протягом досліджуваного періоду не тільки кількісно але також відбулися фундаментальні структурні зрушення у вітчизняній генерації. Зокрема, відбувається перерозподіл на користь атомної енергетики та ВДЕ з одночасним значним зниження ролі ТЕС. Це свідчить про поступове формування нової моделі енергосистеми України, орієнтованої на поєднання атомної генерації та ВДЕ, що фактично визначає нову архітектуру енергетичної безпеки держави в умовах військові загрози.

Результати порівняльного аналізу України та країн-партнерів у рамках Продемонстровано ENTSO-E (Польща, Румунія, Угорщина, Словаччина та Молдова) за 2009–2024 рр. асиметрія генераційних можливостей і різна чутливість національної енергетики системи до військових і ринкових потрясінь. Польща та Румунія виступають як регіональне покоління центри, тоді як Словаччина є ключовим балансуючим елементом через високий рівень виробництва на душу населення навпаки, Угорщина та Молдова характеризуються підвищеною залежністю від транскордонних потоків, що збільшує ризик побічних ефектів. Запропонована формалізована модель оцінки та прогнозування ризиків переливу дозволяє нам кількісно пов'язати інтенсивність страйків, потрясінь електропостачання та змін в Зовнішня торгівля України з потенційними наслідками для енергетичних ринків Європи країни. Отримані результати підтверджують, що перехід України від експорту до імпорту.

Баланс імпорту електроенергії з 2023–2024 рр. є важливим каналом транскордонного ризику трансферт, що впливає на збалансованість системи та макроекономічну стабільність партнерів.

Зокрема, IRM надає практичний інструментарій підтримки прийняття рішень для кількох ключових зацікавлених сторони: регуляторні органи можуть використовувати модель для обґрунтування диверсифікації енергетики політики та визначення пріоритетів стратегічних резервів інфраструктури; оператори системи передачі (TSO) можуть застосовувати структуру для цільового стрес-тестування з'єднувальних з'єднань і проактивно балансування мережі через цифрові двійники; і агентства з реагування на кризи можуть використовувати результати для внутрішнього антикризового планування, включаючи розрахунок компенсаційних механізмів для критичних економічних секторів та координації стратегічного імпорту енергії протягом періодів пікове навантаження системи.

З практичної точки зору, запропоновану рамкову модель можуть застосовувати оператори ГТС для стрес-тестування стійкості з'єднань і виявлення вразливих вузлів балансування в рамках ENTSO-E. Органи регулювання енергетики можуть використовувати модель для сценарного планування, визначення пріоритетів резервних потужностей та оцінка транскордонної електроенергетичної залежності в умовах кризи умови. Крім того, установи управління кризовими ситуаціями можуть застосовувати структуру для діагностики раннього попередження, координації заходів реагування на надзвичайні ситуації та оцінки каскадні ризики, пов'язані з військовими та гібридними загрозами критичній інфраструктурі.

Одним із результатів дослідження є обґрунтування доцільності інтеграції класичних економетричних підходів із цифровими інструментами управління ризиками. Використання цифрових двійників технологій та енергетичних блокчейн-рішень розглядається як перспективний напрям для підвищення системної стійкості, що дозволяє переходити від реактивного реагування до проактивного управління ризиками перед фізичними та кібернетичними загрозами. Спираючись на цю структуру, наші майбутні дослідження будуть

зосереджені на двох основних завданнях. Ми маємо намір провести суть дослідження практичної інтеграції цифрових близнюків для стрес-тестування мережі в режимі реального часу і протоколи на основі блокчейну для децентралізованого балансування в мережі ENTSO-E.

Ці завдання дозволять інтегрувати військовий, кібернетичний і ринковий виміри уніфікована стратегія безпеки на основі даних для взаємопов'язаного європейсько-українського енергетичного простору.

Результати також підкреслюють, що ризик, стійкість і стійкість є інтегрованими аналітична основа для оцінки енергетичних систем в умовах воєнного часу. Поки ризик фіксує масштаб потрясінь, а стійкість відображає здатність реагувати та відновлюватися, стійкість визначає довгострокову стабільність взаємопов'язаних енергетичних систем під постійні зовнішні загрози.

Підсумовуючи, результати дослідження показують, що удари по енергетичній інфраструктурі України створюють багатовимірні ризики поширення ефекту для європейських країн і водночас час прискорити структурну трансформацію української електроенергетики. Ці процеси визначають стратегічні орієнтири розвитку промисловості наряду посилення ролі безвуглецевої генерації, модернізації теплового сектору та диверсифікація джерел енергопостачання в контексті відновлення після перемоги. Запропоновані підходи мають практичне значення для формування скоординованої Енергетична політика ЄС–Україна та розробка ефективних механізмів захисту та відновлення критичної інфраструктури.

Післявоєнне енергетичне відновлення України має бути зосереджене не лише на відновленні пошкодженої інфраструктури, а й на трансформації енергетичної системи в бік вищої стійкості і стійкості.

У цьому контексті прискорена інтеграція відновлюваної енергетики джерела, децентралізоване виробництво, технології розумних мереж і транскордонна синхронізація з ENTSO-E можуть значно посилити адаптивну здатність енергетичного сектору під майбутніми військовими та гібридними

загрозами. У той же час запропонована модель IRM служить як практичний аналітичний інструмент для управління ризиками стійкої енергетики, що дозволяє ідентифікувати, оцінювати, моніторинг і пом'якшення системних і транскордонних ризиків поширення в умовах високої невизначеності та геополітичної нестабільності.

ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Law of Ukraine “On the Principles of State Policy of National Memory of the Ukrainian People”. Available online:
<https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/4579-20#Text> (accessed on 26 September 2025).
2. World Economic Forum. Global Risks Report 2026. Available online:
<https://www.weforum.org/publications/global-risksreport-2026/> (accessed on 25 January 2026).
3. Mendoza-Jiménez, M.; Van Exel, J.; Brouwer, W. On spillovers in economic evaluations: Definition, mapping review and research agenda. *Eur. J. Health Econ.* 2024, 25, 1239–1260. [CrossRef]
4. Huang, Q.; Wang, B.; Lin, J. The risk spillover between geopolitical risk and China’s 5G, semiconductor and rare earth industries. *Heliyon* 2024, 10, e40048. [CrossRef]
5. Ghallabi, F.; Ghorbel, A.; Karim, S. Decoding systemic risks across commodities and emerging market stock markets. *Financ. Innov.* 2025, 11, 47. [CrossRef]
6. Wang, X.; Zhang, J.; Chen, X.; Zhang, H.; Wong, C.; Chan, T. Heterogeneous spillover networks and spatial–temporal dynamics of systemic risk transmission: Evidence from G20 Financial Risk Stress Index. *Mathematics* 2025, 13, 1353. [CrossRef]
7. Debarsy, N.; Dossougoin, C.; Ertur, C.; Gnabo, J. Measuring sovereign risk spillovers and assessing the role of transmission channels: A spatial econometrics approach. *J. Econ. Dyn. Control* 2018, 87, 21–45. [CrossRef]
8. Semenenko, O.; Kuravskiyi, V.; Kliat, Y.; Cherniavskiyi, R.; Chernyshova, I. Energy security as a key factor in Ukrainian economic resilience in the time of war. *Sci. Bull. Mukachevo State Univ. Ser. Econ.* 2025, 12, 118–133. [CrossRef]
9. Kumar, P. From dependency to resilience: Europe’s energy landscape amid the Russia–Ukraine war. *Clim. Energy* 2025, 42, 16–21.

[CrossRef]

10. Tampubolon, M. Russia's invasion of Ukraine and its impact on global geopolitics. *Eur. Sci. J.* 2022, 18, 48. [CrossRef]

11. Piekarski, M. Critical infrastructure as a target of hybrid and conventional attacks: Lessons from the Ukrainian experience.

Terror.–Stud. Anal. Prewencja 2025, 113–132. [CrossRef]

12. Petrilean, D.C.; Fîț,ă, N.D.; Vasilescu, G.D.; Ilieva-Obretenova, M.; Tataru, D.; Cruceru, E.A.; Mateiu, C.I.; Nicola, A.;

Darabont, D.-C.; Cazac, A.-M.; et al. Sustainability management through the assessment of instability and insecurity risk

scenarios in Romania's energy critical infrastructures. *Sustainability* 2025, 17, 2932. [CrossRef]

13. Timashov, V.O.; Yarova, R.O. Military threats to energy infrastructure: Legal mechanisms of protection. *Anal. Comp. Jurisprud.*

2025, 3, 273–277. [CrossRef]

14. Timashov, V.O.; Adamovych, V.O. Organizational and legal support for Ukraine's energy security against cyberattacks and drone

threats. *Anal. Comp. Jurisprud.* 2025, 4, 367–373. [CrossRef]

15. Aljohani, T. Cyberattacks on energy infrastructures: Modern war weapons. *arXiv* 2022, arXiv:2208.14225. [CrossRef]

16. Kutsyk, V.I.; Horodnia, T.A.; Kulchytskyi, M.R. Economic security of enterprises in Ukraine in the context of cyber threats from

the Russian Federation during the Russo-Ukrainian war. *Black Sea Econ. Stud.* 2025, 93, 64–68. [CrossRef]

17. Tkachenko, A.; Levchenko, S. Vectors of ensuring economic security of energy enterprises in the context of quantum transformation. *Econ. Reg.* 2025, 1, 248–254.

[CrossRef]

18. Law of Ukraine “On Critical Infrastructure”. Available online: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1882-20?lang=en#Text>

(accessed on 5 October 2025).

19. Law of Ukraine “On the Basic Principles of Ensuring Cybersecurity of Ukraine”. Available online: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2163-19#Text> (accessed on 27 October 2025).
20. Cabinet of Ministers of Ukraine. Resolution No. 518 of 19 June 2019 “On Approval of General Cybersecurity Requirements for Critical Infrastructure Facilities”. Available online: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/518-2019-%D0%BF?lang=en#Text> (accessed on 15 November 2025).
21. Cabinet of Ministers of Ukraine. Resolution No. 943 of 9 October 2020 “Some Issues of Critical Information Infrastructure Facilities”. Available online: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/943-2020-%D0%BF?lang=en#Text> (accessed on 3 January 2026).
<https://doi.org/10.3390/su18126044>
Sustainability 2026, 18, 6044 39 of 42
22. Ministry of Energy of Ukraine. Order No. 417 of 15 December 2022 “Cybersecurity Requirements for the Fuel and Energy Sector as Critical Infrastructure”. Available online: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0249-23?lang=en#Text> (accessed on 10 August 2025).
23. Tkach, D.; Tkach, D. The main losses of the Ukrainian energy system as a result of massive attacks by Russia. *Econ. Financ. Manag. Rev.* 2023, 2, 51–59. [CrossRef]
24. Hryhorczuk, D.; Levy, B.; Prodanchuk, M.; Kravchuk, O.; Bubalo, N.; Hryhorczuk, A.; Erickson, T. The environmental health impacts of Russia’s war on Ukraine. *J. Occup. Med. Toxicol.* 2024, 19, 1. [CrossRef] [PubMed]
25. Bielikov, A.S.; Pylypenko, O.V.; Shalomov, V.A.; Sankov, P.M.; Tymchenko, P.O.; Rudenko, V.P. Analysis of the destruction of Ukrainian nuclear fuel cycle energy facilities as a result of Russian military operations. *Ukr. J. Civ. Eng. Archit.* 2024, 3, 48–57.

Available online: <https://uajcea.pgasa.dp.ua/article/view/309168> (accessed on 6 October 2025).

26. Popik, T. Preserving Ukraine's electric grid during the Russian invasion. *J. Crit. Infrastruct. Policy* 2022, 3, 15–55. [CrossRef]
27. Loza, S.; Bondarenko, H. Cyber defence of energy companies as a guarantee of their economic security. *Actual Probl. Innov. Econ. Law* 2024, 6, 92–96. [CrossRef]
28. Cui, L.; Yue, S.; Nghiem, X.; Duan, M. Exploring the risk and economic vulnerability of global energy supply chain interruption in the context of the Russo-Ukrainian war. *Resour. Policy* 2023, 81, 103373. [CrossRef]
29. Mišić, M.; Nosko, A. Post-pandemic lessons for EU energy and climate policy after the Russian invasion of Ukraine: Introduction to a special issue on EU green recovery in the post-Covid-19 period. *Energy Policy* 2023, 177, 113546. [CrossRef]
30. Ohikhuare, O. How geopolitical risk drives spillover interconnectedness between crude oil and exchange rate markets: Evidence from the Russia–Ukraine war. *Resour. Policy* 2023, 104282. [CrossRef]
31. Umar, Z.; Polat, O.; Choi, S.; Teplova, T. The impact of the Russia–Ukraine conflict on the connectedness of financial markets. *Financ. Res. Lett.* 2022, 48, 102976. [CrossRef]
32. Yang, Y.; Zhao, L.; Zhu, Y.; Chen, L.; Wang, G. Spillovers from the Russia–Ukraine conflict. *SSRN Electron. J.* 2022. [CrossRef]
33. Li, P.; Zhang, P.; Guo, Y.; Li, J. How has the relationship between major financial markets changed during the Russia–Ukraine conflict? *Humanit. Soc. Sci. Commun.* 2024, 11, 4231. [CrossRef]
34. Guo, X.; Lu, X.; Mu, S.; Zhang, M. New roles for energy and financial markets in spillover connections: Context under COVID-19 and the Russia–Ukraine conflict. *Res. Int. Bus. Financ.* 2024, 71, 102403. [CrossRef]
35. Vo, D.; Tran, M. Volatility spillovers between energy and agriculture markets during the ongoing food & energy crisis: Does

- uncertainty from the Russo-Ukrainian conflict matter? *Technol. Forecast. Soc. Change* 2024, 208, 123723. [CrossRef]
36. Shen, Y.; Feng, Q.; Sun, X. Stability and risk contagion in the global sovereign CDS market under the Russia–Ukraine conflict. *N. Am. J. Econ. Financ.* 2024, 74, 102204. [CrossRef]
37. Qureshi, A.; Rizwan, M.; Ahmad, G.; Ashraf, D. Russia–Ukraine war and systemic risk: Who is taking the heat? *SSRN Electron. J.* 2022. [CrossRef]
38. Sio-Chong U, T.; Lin, Y.; Wang, Y. The impact of the Russia–Ukraine war on volatility spillovers. *Int. Rev. Financ. Anal.* 2024, 93, 103194. [CrossRef]
39. Bouri, E.; Gabauer, D.; Gupta, R.; Kinatader, H. Global geopolitical risk and inflation spillovers across European and North American economies. *Res. Int. Bus. Financ.* 2023, 66, 102048. [CrossRef]
40. Li, Z.; Hu, B.; Zhang, Y.; Yang, W. Financial market spillovers and investor attention to the Russia–Ukraine war. *Int. Rev. Econ. Financ.* 2024, 96, 103521. [CrossRef]
41. Federle, J.; Meier, A.; Müller, G.; Sehn, V. Proximity to war: The stock market response to the Russian invasion of Ukraine. *J. Money Credit Bank.* 2026, 58, 681–703. [CrossRef]
42. Zhou, W.; Dai, Y.; Duong, K.; Dai, P. The impact of the Russia–Ukraine conflict on the extreme risk spillovers between agricultural futures and spots. *J. Econ. Behav. Organ.* 2023, 217, 91–117. [CrossRef]
43. Sivaprasad, S.; Adami, R.; Malki, I.; Ibragimova, D.; Yodgorova, F. Spillover effects of geopolitical risk on the banking sectors of post-Soviet countries. *Rev. Behav. Financ.* 2025, 17, 544–563. [CrossRef]
44. Yelwa, M. Exploring the impact of Russia’s military operations on regional security in Eastern Europe: The case of the Russia–Ukraine war. *Afr. J. Soc. Issues* 2025, 8, 377–394. [CrossRef]
45. Myajaya, R. The impact of the Russia–Ukraine conflict on international relations. *J. Law Soc. Politics* 2024, 2, 102–109. [CrossRef]

46. State Statistics Service of Ukraine. Economic Statistics/Economic Activity/Energy. Total Primary Energy Supply for 2007–2021. Available online: <https://ukrstat.gov.ua/> (accessed on 5 September 2025).
47. Sustainable Development Goals of Ukraine. Indicator 7.1.1 “Electricity Generation, Billion kWh”. Available online: <https://sdg.ukrstat.gov.ua/uk/7-1-1/> (accessed on 8 September 2025).
48. International Atomic Energy Agency. Country Nuclear Power Profiles: Ukraine. Available online: https://wwwpub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/CNPP2013_CD/countryprofiles/Ukraine/Ukraine.htm (accessed on 15 September 2025). <https://doi.org/10.3390/su18126044> Sustainability 2026, 18, 6044 40 of 42
49. Our World in Data. Energy Statistics for Ukraine. Available online: <https://ourworldindata.org/search?topics=Energy&countries=Ukraine> (accessed on 13 September 2025).
50. The Exploration & Production Consulting (EXPRO). Electricity Generation from Renewable Sources in Ukraine Increased by 6.4% in 2024. Available online: <https://expro.com.ua/en/tidings/electricity-generation-from-renewable-sources-in-ukraine-in-2024-increased-by-64> (accessed on 25 March 2025).
51. Countryeconomy.com. Ukraine—Electricity Generation Statistics. Available online: <https://countryeconomy.com/energy-andenvironment/electricity-generation/ukraine> (accessed on 16 September 2025).
52. ENTSO-E. Statistical Factsheet 2022. Available online: https://eepublicdownloads.blob.core.windows.net/public-cdncontainer/clean-documents/Publications/Statistics/Factsheet/entsoe_sfs2022_web.pdf (accessed on 7 October 2025).
53. ENTSO-E. Statistical Factsheet 2023. Available online: <https://eepublicdownloads.blob.core.windows.net/public-cdncontainer/clean->

documents/Publications/Statistics/Factsheet/entsoe_sfs2023_web.pdf (accessed on 7 October 2025).

54. ENTSO-E. Statistical Factsheet 2024. Available online: https://eepublicdownloads.blob.core.windows.net/public-cdncontainer/clean-documents/Publications/Statistics/Factsheet/entsoe_sfs2024_web.pdf (accessed on 7 October 2025).

55. Shpak, N.; Seliuchenko, N.; Dvulit, Z.; Kniaz, S.; Kucher, L. Assessment of the impact of macroeconomic crises and war on the activities of JSC “Ukrzaliznytsia”. *Financ. Credit Act. Probl. Theory Pract.* 2023, 6, 260–272. [CrossRef]

56. Shpak, N.; Maznyk, L.; Dvulit, Z.; Doroshkevych, K.; Horbal, N.; Kis, S. Smart contract as a way to exchange digital values in blockchain. In *Proceedings of the 2021 IEEE 16th International Conference on Computer Sciences and Information Technologies (CSIT)*, Lviv, Ukraine, 22–25 September 2021; pp. 403–406. [CrossRef]

57. Dvulit, Z.; Maznyk, L.; Maznyk, K.; Brych, L.; Dvulit, M.-M.; Iwaszczuk, N.; Iwaszczuk, A. Using digital twin (DT) technology for workforce demand forecasting in the post-war reconstruction of Ukraine. In *Proceedings of the 2nd International Conference on Smart Automation & Robotics for Future Industry (SMARTINDUSTRY–2025)*, Lviv, Ukraine, 3–5 April 2025; Volume 3678, pp. 112–124.

58. Tsarenko, A. Overview of Gas Market in Ukraine. Center for Social and Economic Research. Available online: <https://caseukraine.com.ua/content/uploads/2020/09/Overview-of-Gas-Market-in-Ukraine.pdf> (accessed on 9 July 2025).

59. USAID Energy Security Project. Increased Integration of Ukrainian and Polish Transmission Systems and Gas Markets. Final Report. Available online: <https://tsoua.com/en/news/ukraine-and-poland-must-overcome-seven-barriers-by-2023-to-integrate-gas-markets-usaid-report/> (accessed on 21 November 2025).

60. Keliauskaite, U.; McWilliams, B.; Sgaravatti, G.; Zachmann, G. European Natural Gas Imports Dataset. Available online: <https://www.bruegel.org/dataset/european-natural-gas-imports> (accessed on 23 January 2026).
61. Goriunov, D.; Piddubnyi, I. Assessment of Damages and Losses to Ukraine's Energy Sector Due to Russia's Full-Scale Invasion. Kyiv School of Economics. 2024. Available online: https://kse.ua/wp-content/uploads/2024/06/KSE_Impact-of-the-war-onenergy_ENG-1.pdf (accessed on 14 August 2025).
62. Energy Community. Ukraine—Contracting Party Profile. Available online: <https://www.energy-community.org/contractingparties/Ukraine.html> (accessed on 14 August 2025).
63. Directive 2001/80/EC of the European Parliament and of the Council of 23 October 2001 on the Limitation of Emissions of Certain Pollutants into the Air from Large Combustion Plants. Available online: <https://eur-lex.europa.eu/legalcontent/EN/TXT/?uri=CELEX:32001L0080> (accessed on 24 August 2025).
64. Directive 2010/75/EU of the European Parliament and of the Council of 24 November 2010 on Industrial Emissions (Integrated Pollution Prevention and Control) (Recast). Available online: <https://eur-lex.europa.eu/legalcontent/EN/TXT/?uri=CELEX:32010L0075> (accessed on 23 August 2025).
65. Law of Ukraine “On Electric Power Industry”. Available online: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/575/97-%D0%B2%D1%80?lang=en#Text> (accessed on 5 May 2018).
66. Ukrainian Energy (ua-energy.org). Ukraine Imported a Record Amount of Electricity in 2024, the Highest in 11 Years. Available online: <https://ua-energy.org/uk/posts/ukraina-u-2024-rotsi-importovala-rekordnyi-obsiah-elektroenerhii-za-11-rokiv> (accessed on 4 September 2025).

67. The Exploration & Production Consulting (EXPRO). In 2024, Ukraine Increased Electricity Imports by 5.5 Times, to 4.4 Million MWh. Available online: <https://expro.com.ua/novini/u-2024-r-ukrana-zblshila-mport-elektroenerg-v-55-razv--do-44-mlnmvtgod-> (accessed on 16 September 2025).
68. Ministry of Energy of Ukraine. Ukraine's Power Network Integration with the EU ENTSO-E. Available online: <https://mev.gov.ua/en/reforma/ukraines-power-network-integration-eu-entso-e> (accessed on 11 September 2025).
69. European Network of Transmission System Operators for Electricity (ENTSO-E). Official Website. Available online: <https://www.entsoe.eu/> (accessed on 1 August 2025).
70. International Energy Agency (IEA). Energy and AI. 2025. Available online: <https://www.iea.org/reports/energy-and-ai> (accessed on 1 July 2025).
<https://doi.org/10.3390/su18126044>
Sustainability 2026, 18, 6044 41 of 42
71. European Commission. Digitalisation of the Energy System. Available online: https://energy.ec.europa.eu/topics/eus-energysystem/digitalisation-energy-system_en (accessed on 12 December 2025).
72. Streimikiene, D.; Siksnyte-Butkiene, I.; Lekavicius, V. Energy diversification and security in the EU: Comparative assessment in different EU regions. *Economies* 2023, 11, 83. [CrossRef]
73. Vošta, M. EU energy transformation and diversification: Energy security in the context of geopolitical changes. *Politics Cent. Eur.* 2025, 21, 265–283. [CrossRef]
74. Ministry of Energy of Ukraine. International Assistance to the Energy Sector. Available online: <https://mev.gov.ua/en/reforma/international-assistance-energy-sector> (accessed on 17 August 2025).
75. Ministry of Energy of Ukraine. Results of 2024 (Annual Summary). Available online: <https://mev.gov.ua/novyna/pidsumky2024-roku> (accessed on 19 August 2025).

76. Razumkov Centre. Review of the Energy Sector Performance in October 2025. Available online: https://razumkov.org.ua/images/2026/01/05/2025_ENERGY_November.pdf (accessed on 28 December 2025).
77. Security Service of Ukraine. SSU Classifies Russia's Strikes on Ukrainian Energy Infrastructure as Crimes Against Humanity (Video). Available online: <https://ssu.gov.ua/en/novyny/sbu-kvalifikuie-udary-rf-po-ukrainskii-enerhetytsi-yak-zlochynyproty-liudianosti-video> (accessed on 17 January 2026).
78. State Statistics Service of Ukraine (Ukrstat). Population Size and Structure. Available online: <https://stat.gov.ua/en/publications/population-size-and-structure> (accessed on 19 August 2025).
79. Macrotrends. Ukraine Population Data. Available online: <https://www.macrotrends.net/datasets/globalmetrics/countries/ukr/ukraine/population> (accessed on 3 September 2025).
80. V Chas Pik Portal. Ukraine's Population Decline and New Initiatives (News Article). Available online: <https://cutt.ly/dtcs98dL> (accessed on 3 September 2025).
81. World Bank. Population, Total—Ukraine. Available online: <https://data.worldbank.org/indicator/SP.POP.TOTL?end=2024&start=2009&view=chart> (accessed on 3 September 2025).
82. Eurostat. Energy Database. Available online: <https://ec.europa.eu/eurostat/data/database> (accessed on 3 September 2025).
83. Ukrainska Pravda. Russia Launches 100 Missiles on Ukraine, Outdoing 10 October Attack. Available online: <https://www.pravda.com.ua/eng/news/2022/11/15/7376470/> (accessed on 8 September 2025).
84. Radio Liberty. Ukrainian Military Reported How Many Missiles and Shahed Drones Were Shot Down During the Massive Attack on 15 November 2022. Available online: <https://www.radiosvoboda.org/a/news-ppo-rosiyskyi-udar/32132273.html> (accessed

on 7 September 2025).

85. Prosecutor General's Office of Ukraine. The Largest Simultaneous Missile Attack by Russia on Energy Facilities in Kharkiv

Region—Prosecutors Conduct Site Inspections. Available online: <https://gp.gov.ua/ua/posts/naibilsa-odnocasna-raketna-atakarf-na-energoobjekti-xarkivshhini-prokurori-provodyat-oglyadi-misc-podii> (accessed on 20 September 2025).

86. Prosecutor General's Office of Ukraine. Investigation Launched into the Massive Shelling of Zaporizhzhia and the Dnipro

Hydroelectric Power Plant. Available online: <https://gp.gov.ua/ua/posts/rozpocato-rozsliduvannya-za-faktom-masovanogoobstrilu-zaporizhya-ta-dniprovskoyi-ges> (accessed on 23 September 2025).

87. Prosecutor General's Office of Ukraine. Occupiers Attacked Energy Infrastructure in Odesa Region with Drones—Investigation Initiated. Available online:

<https://gp.gov.ua/ua/posts/okupanti-atakuvali-bezpilotnikami-energeticnu-infrastrukturu-odeshhinirozpocato-rozsliduvannya> (accessed on 6 October 2025).

88. Ministry of Internal Affairs of Ukraine. Start of Massive Missile Shelling of Critical Infrastructure Facilities in Ukraine. Available

online: <https://mvs.gov.ua/en/news/masovani-raketni-obstrili-vorogom-objektiv-kriticnoyi-infrastrukturi-ukrayini> (accessed on 3 December 2025).

89. Slovo i Dilo Analytical Portal. Air Defence Forces Shot Down 84 Targets Overnight—Details. Available online:

<https://www.slovoidilo.ua/2024/03/29/novyna/bezpeka/syly-protypovitryanoyi-oborony-zbyly-vnochi-84-czili-detali> (accessed on 3 December 2025).

90. TSN.ua. “Kinzhal” Ballistic Missiles, Cruise Missiles, and Drones: How Many Aerial Targets Were Shot Down During the Russian

Attack. Available online: <https://tsn.ua/ato/kindzhali-aviaciyni-i-krilati-raketi-droni-skilki-povitryanih-ciley-zbila-ppo-pidchas-ataki-rf-2555134.html> (accessed on 13 December 2025).

91. BukInfo Independent Information Portal. Another Massive Strike: How Many Missiles and Drones Russia Launched on 8 May and How Many Were Shot Down. Available online: <https://bukinfo.com.ua/viyna-na-shodi/ce-znovu-buv-masovanyy-udarstalo-vidomo-skilky-raket-i-droniv-zapustyla-8-travnya-rosiya-na-ukrajinu-i-skilky-my-zbyly> (accessed on 10 December 2025).
92. 24 Kanal Media. Enemy Attacked with 53 Missiles and 47 UAVs: How Many Were Intercepted. Available online: https://24tv.ua/vorog-atakuvav-53-raketami-47-bpla-skilki-zbili_n2567133 (accessed on 12 December 2025).
93. NV.ua/Interfax-Ukraine. New Strike on the Energy Sector: Facilities Damaged in Zaporizhzhia and Lviv Regions, Air Defence Destroyed 12 of 16 Missiles and 13 Shaheds. Available online: <https://nv.ua/ukr/ukraine/events/nichna-ataka-rf-22-chervnyarosiya-atakuvala-ukrajinu-shahedami-ta-krilatimi-raketami-novini-ukrajini-50429248.html> (accessed on 10 December 2025).
<https://doi.org/10.3390/su18126044>
Sustainability 2026, 18, 6044 42 of 42
94. Fakty ICTV. 201 Aerial Targets Shot Down: Russia Launched 127 Missiles and 109 Drones Against Ukraine. Available online: <https://fakty.com.ua/ua/ukraine/20240826-zbyto-201-povitryanu-czil-rf-zapustyla-po-ukrayini-127-raket-i-109-droniv/> (accessed on 12 December 2025).
95. We Ukraine Media. Russians Launched 35 Missiles and 381 Drones Overnight—How Many Were Intercepted. Available online: <https://weukraine.tv/top/rosijani-vnochi-zapustili-po-ukrajini-35-raket-i-381-dron-skilki-zbito/> (accessed on 9 December 2025).
96. Slovo i Dilo Analytical Portal. Russian Forces Used More than 700 Drones and Missiles Against Ukraine Overnight: How Many Targets Were Neutralized by Air Defence. Available online: <https://www.slovoidilo.ua/2025/12/06/novyna/bezpeka/vijska-rfvnochi-zastosuvaly->

proty-ukrayiny-700-droniv-raket-skilky-czilej-zneshkodyla-ppo (accessed on 8 December 2025).

97. Suspilne News. Air Force: Air Defence Shot Down 587 Drones and 34 Missiles. Available online: <https://suspilne.media/1196224-povitrani-sili-ppo-zbila-587-droniv-i-34-raketi/> (accessed on 26 December 2025).

98. OBOZ.UA. Russia Launched a Massive Attack on Ukraine with Nearly 300 Missiles and Drones: Air Defence Neutralized 244 Targets. Available online: <https://war.obozrevatel.com/ukr/rosijska-ataka-u-nich-proti-9-sichnya-2026.htm> (accessed on 10 January 2026).