

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»
ФАКУЛЬТЕТ МЕНЕДЖМЕНТУ ТА МАРКЕТИНГУ
КАФЕДРА ЕКОНОМІЧНОЇ КІБЕРНЕТИКИ**

«На правах рукопису»
УДК 332.1; 620.9

ДО ЗАХИСТУ ДОПУЩЕНО:
Завідувач кафедри
_____ Катерина БОЯРИНОВА
«__» грудня 2025 р.

МАГІСТЕРСЬКА ДИСЕРТАЦІЯ

**на здобуття ступеня магістра
за освітньо-професійною програмою
«Економічна аналітика»
зі спеціальності 051 Економіка**

**на тему: «Аналітика стратегічних інновацій у підвищенні
економічної безпеки енергетичного сектору»**

Виконала:

студентка 2-го курсу, групи УА-41мп
КЛИМОВИЧ Ольга Романівна _____

Науковий керівник:

завідувач кафедри економічної кібернетики, д.е.н., проф.
БОЯРИНОВА Катерина Олександрівна _____

Рецензент:

завідувач кафедри економіки і підприємництва, д.е.н., проф.
ТУЛЬЧИНСЬКА Світлана Олександрівна _____

Засвідчую, що у цій магістерській дисертації немає
запозичень з праць інших авторів без відповідних
посилань

Студентка _____

Київ – 2025 року

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»

Факультет менеджменту та маркетингу

Кафедра економічної кібернетики

Рівень вищої освіти - другий (магістерський)

Спеціальність - 051 Економіка

Освітньо-професійна програма «Економічна аналітика»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

_____ Катерина БОЯРИНОВА

« » _____ 2025 р.

ЗАВДАННЯ

на магістерську дисертацію студенту

КЛИМОВИЧ Ользі Романівні

- 1. Тема дисертації** «Аналітика стратегічних інновацій у підвищенні економічної безпеки енергетичного сектору»,
науковий керівник дисертації Бояринова Катерина Олександрівна, д.е.н., проф.,
затверджені наказом по університету від 03.11.2025 року № 4740-с.
- 2. Термін подання студентом дисертації** 12.12.2025 року.
- 3. Об'єкт дослідження:** процеси забезпечення економічної безпеки енергетичного сектору України.
- 4. Предмет дослідження (Вихідні дані):** теоретичні, методичні та прикладні положення, аналітики стратегічних інновацій у підвищенні економічної безпеки енергетичного сектору України та її регіонів. Вихідними даними є статистичні дані Державної служби статистики України, аналітичні матеріали Міністерства енергетики України, НКРЕКП, НЕК «Укренерго», платформи Оператор ринку, аналітичної платформи Energy Map, Міжнародного енергетичного агентства та інших авторитетних джерел.

5. Перелік завдань, які потрібно розробити:

а) теоретична частина:

- розкрити теоретичні основи інновацій та економічної безпеки енергетичного сектору;
- дослідити чинники та індикатори впливу на економічну безпеку енергетичного сектору;
- обґрунтувати вибір методичних підходів та інструментарію економічної аналітики інновацій енергетичного сектору на стратегічній основі.

б) аналітична частина:

- оцінити вплив стратегічних інновацій на економічну безпеку енергетичного сектору;
- проаналізувати енергетичний сектор регіонів України у розрізі взаємозв'язків стратегічних інновацій та економічної безпеки;
- провести аналітичне моделювання регіональних економетричних моделей економічної безпеки енергетичного сектору України.

в) рекомендаційна частина:

- розробити аналітичний інструментарій оцінювання стратегічних інновацій для забезпечення економічної безпеки енергетичного сектору;
- сформулювати економічні рішення підвищення економічної безпеки енергетичного сектору на основі стратегування інновацій;
- провести прогностичну аналітику стратегічних інновацій та сценарне моделювання підвищення економічної безпеки енергетичного сектору.

6. Перелік графічного (ілюстративного) матеріалу:

- 1) Ключові напрями інноваційної діяльності в енергетичному секторі.
- 2) Функції економічної безпеки держави
- 3) Фактори інноваційного впливу на економічну безпеку енергетичного сектору.
- 4) Динаміка показника інвестицій в енергетичну інфраструктуру за роками.
- 5) Динаміка показника інновацій за роками.
- 6) Динаміка показника кількості введених до експлуатації розумних лічильників за роками.
- 7) Динаміка індикаторів інноваційної та інвестиційної діяльності кластерів.
- 8) Кореляційний аналіз регіонів України за відібраними факторами інноваційного впливу на економічну безпеку енергетичного сектору.
- 9) Прогнозовані обсяги залучених у регіони інвестицій відповідно до запропонованих рекомендацій.
- 10) Прогнозовані обсяги встановлення розумних лічильників за регіонами відповідно до трьох сценаріїв.
- 11) Середній індекс економічної безпеки під впливом факторів стратегічних інновацій за кластерами.
- 12) Регіони з найкращими прогностичними показниками індексу економічної безпеки під впливом інноваційного розвитку енергетичного сектору згідно трьох сценаріїв у 2025 році за областями.

7. Орієнтовний перелік публікацій за напрямом роботи:

- 1) Статті у наукових журналах (видання категорії Б);
- 2) Тези доповіді на Міжнародній науково-практичній конференції.

8. Дата видачі завдання: 26 червня 2025 року.

Календарний план

<i>№ з/п</i>	<i>Назва етапів виконання магістерської дисертації</i>	<i>Термін виконання етапів магістерської дисертації</i>	<i>Примітка</i>
1.	Вибір напрямку дослідження, узгодження завдання та змісту магістерської дисертації з науковим керівником.	02.06.2025-27.06.2025	
2.	Збір необхідної інформації, вивчення та аналіз літературних джерел щодо досліджуваної тематики.	30.06.2025-08.09.2025	
3.	Розгляд теоретико-методичних підходів до економічної аналітики стратегічних інновацій у підвищенні економічної безпеки енергетичного сектору. Надання на перевірку першого розділу.	09.09.2025-30.09.2025	
4.	Діагностична аналітика впливу стратегічних інновацій на економічну безпеку енергетичного сектору.	01.10.2025-10.10.2025	
5.	Кластерний аналіз енергетичного сектору регіонів України у розрізі взаємозв'язків стратегічних інновацій та економічної безпеки.	11.10.2025-20.10.2025	
6.	Аналіз регіональних економетричних моделей економічної безпеки енергетичного сектору. Надання на перевірку другого розділу.	21.10.2025-30.10.2025	
7.	Розроблення аналітичного інструментарію оцінювання інновацій для забезпечення економічної безпеки енергетичного сектору.	31.10.2025-07.11.2025	
8.	Підготовка економічних рішень підвищення економічної безпеки енергетичного сектору на основі стратегування інновацій.	08.11.2025-16.11.2025	
9.	Прогностична аналітика стратегічних інновацій та сценарне моделювання підвищення економічної безпеки енергетичного сектору. Надання на перевірку третього розділу.	17.11.2025-30.11.2025	
10.	Оформлення магістерської дисертації другого (магістерського) рівня вищої освіти.	01.12.2025-03.12.2025	
11.	Подання магістерської дисертації для перевірки на збіг/схожість, отримання відгуку керівника та рецензії.	04.12.2025-11.12.2025	
12.	Подання магістерської дисертації до захисту.	12.12.2025	

Студентка
Науковий керівник

Ольга КЛИМОВИЧ
Катерина БОЯРИНОВА

РЕФЕРАТ

Магістерська дисертація Климович Ольги Романівни на тему «Аналітика стратегічних інновацій у підвищенні економічної безпеки енергетичного сектору» зі спеціальності 051 Економіка, освітньо-професійної програми «Економічна аналітика», Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», 2025, Київ.

Магістерська дисертація складається зі вступу, 3 розділів, висновків, списку використаних джерел та додатків. Виконана в обсязі 158 сторінок, містить 50 рисунків, 5 таблиці та 1 додаток.

Актуальність теми. Енергетичний сектор України перебуває в кризовому стані, адже війна спричиняє значні руйнування інфраструктури і тягне за собою багатомільйонні збитки. Сучасні підходи для діагностування й прогнозування впливу стратегічних інновацій на показник економічної безпеки енергетичного сектору залишаються ключовими напрямками досліджень.

Зв'язок дослідження з науковими програмами, планами, темами. Магістерська дисертація виконувалась в Національному технічному університеті України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» відповідно до планів наукових досліджень кафедри економічної кібернетики за темою «Аналітика стратегічних інновацій у підвищенні економічної безпеки енергетичного сектору» (№ ДР 0123U101760). Роль автора полягає у систематизації досліджень аналізу впливу стратегічних інновацій на підвищення економічної безпеки енергосектору, формуванні аналітичного апарату для побудови моделей економічної безпеки енергетичного сектору України.

Метою магістерської дисертації є розгляд теоретичних засад, розроблення та апробація методичних положень щодо аналітики стратегічних інновацій у підвищенні економічної безпеки енергетичного сектору України, формування обґрунтованих практичних рекомендацій щодо підвищення безпекової стійкості на цій основі.

Завдання дослідження: розкриття теоретичних та методичних положень інновацій та економічної безпеки енергетичного сектору України, здійснення аналізу впливу інноваційних чинників на економічну безпеку енергетичного сектору, формування методів та підходів для оцінки стану економічної безпеки енергетичного сектору та пов'язаних з ним факторів, проведення діагностичної аналітики впливу стратегічних інновацій на економічну безпеку енергетичного сектору, виконання кластерного аналізу та побудови регіональних економетричних моделей економічної безпеки енергетичного сектору України, розроблення інструментарію та проведення імітаційного сценарного і прогнозного моделювання впливу індикаторів на безпеку енергетичного сектору, оцінка впливу сформованих рекомендацій на стан економічної безпеки енергетичного сектору.

Об'єкт дослідження – процеси забезпечення економічної безпеки енергетичного сектору України.

Предмет дослідження – теоретичні, методичні та прикладні положення, аналітики стратегічних інновацій у підвищенні економічної безпеки енергетичного сектору України та її регіонів.

Методи дослідження. У магістерській дисертації було застосовано низку сучасних методів проведення наукового дослідження, що сприяли розробці поставленої мети та виконанню завдань: методи збору та попередньої обробки даних, методи діагностичного аналізу, методи статистичного аналізу, інструментарій машинного навчання, методи економетричного та просторового моделювання, методи сценарного прогнозування.

Наукова новизна одержаних результатів. Науковою новизною є удосконалення положень щодо проведення прогностичної та регіональної стратегічної аналітики інновацій, її впливу на економічну безпеку енергетичного сектору, обґрунтування економічних рішень у сфері інноваційної політики розвитку енергетичного сектору.

Практичне значення одержаних результатів. Запропоновані та апробовані методологічні положення стратегічної аналітики інновацій можуть бути застосовані органами державного апарату для виявлення та попередження проблем розвитку енергетичного сектору.

Апробація результатів магістерської дисертації: Виступ на конференції з публікацією тез доповіді: Климович О. Р., Бояринова К. О., Кінчев О. І. Ідентифікація регіональних відмінностей енергетичного розвитку України за допомогою методів багатовимірної статистики. *Актуальні проблеми економіки, обліку, управління та права в XXI столітті* : зб. тез доп. міжнар. науково-практ. конф., м. Черкаси, 11 листоп. 2025 р. 2025. С. 8–12.

Публікації. Стаття (видання категорії Б):

1) Бояринова К., Климович О., Кінчев О. Аналітичне моделювання енергетичної безпеки України з урахуванням регіональних детермінант інноваційного розвитку. *Економічний аналіз*. 2025. Т. 35, № 3. С. 308–322. URL: <https://doi.org/10.35774/econa2025.03.308>;

2) Шевчук О. А., Климович О. Р. Інноваційний розвиток України в умовах трансформаційних змін. *Економічний вісник Донбасу*. 2024. № 3 (77). С. 130–139. URL: [https://doi.org/10.12958/1817-3772-2024-3\(77\)-130-139](https://doi.org/10.12958/1817-3772-2024-3(77)-130-139).

Ключові слова: економічна аналітика, економічна безпека, просторове моделювання, стратегічна аналітика, регіональна диференціація, стратегічні інновації, економічні ризики, сценарне моделювання.

ABSTRACT

Master's dissertation by Olha Klymovych on the topic «Analytics of Strategic Innovations in Enhancing the Economic Security of the Energy Sector» in the specialty 051 «Economics», educational and professional program «Economic analytics», National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute», 2025, Kyiv.

The master's dissertation consists of an introduction, 3 chapters, conclusions, a list of references and appendices. The work includes 158 pages, 50 figures, 5 tables and 1 appendix.

The relevance of the topic. The energy sector of Ukraine is currently in a state of crisis, as the war causes significant infrastructure destruction and entails multimillion-dollar losses. Modern approaches for diagnosing and forecasting the impact of strategic innovations on the economic security index of the energy sector remain key research areas.

Connection of work with scientific programs, plans, topics. The master's thesis was completed at the National Technical University of Ukraine ‘Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute’ in accordance with the research plans of the Department of Economic Cybernetics on the topic ‘Analytics of strategic innovations in improving the economic security of the energy sector’ (No. DR 0123U101760). The author's role consists of systematizing research on the energy sector analysis, forming an econometric apparatus for constructing models of regional resilience in the country under conditions of uncertainty.

The purpose of study is to examine the theoretical foundations, develop and approve methodological provisions regarding the analytics of strategic innovations in enhancing the economic security of the energy sector of Ukraine, and to form substantiated practical recommendations for improving security resilience on this basis.

Research objectives: to reveal theoretical and methodological provisions of innovation and economic security of the energy sector of Ukraine, to analyse the impact of innovative factors on the economic security of the energy sector, to develop methods and approaches for assessing the state of economic security of the energy sector and related factors, to conduct diagnostic analysis of the impact of strategic innovations on the economic security of the energy sector, to perform cluster analysis and build regional econometric models of economic security. related factors, conducting diagnostic analysis of the impact of strategic innovations on the economic security of the energy sector, performing cluster analysis and building regional econometric models of economic security in Ukraine's energy sector, developing tools and conducting simulation scenario

and predictive modelling of the impact of indicators on the security of the energy sector, assessing the impact of the recommendations made on the state of economic security in the energy sector.

The object of the study is the processes of ensuring the economic security of the energy sector of Ukraine.

The subject of the study is the theoretical, methodological, and applied aspects of analytics of strategic innovations in enhancing economic security of the energy sector of Ukraine and its regions.

Research methods. The master's thesis used a bunch of modern research methods that helped to develop the goal and do the tasks: data collection and pre-processing methods, diagnostic analysis methods, statistical analysis methods, machine learning tools, econometric and spatial modelling methods, and scenario forecasting methods.

Scientific novelty of the results. The scientific novelty lies in the improvement of provisions for predictive and regional strategic analysis of innovations, its impact on the economic security of the energy sector, and the justification of economic decisions in the field of innovation policy for the development of the energy sector.

Practical significance of the results. The proposed and tested methodological provisions of strategic innovation analytics can be applied by state authorities to identify and prevent problems in the development of the energy sector.

Approbation of work results Conference presentation and publication of theses: Klymovych O. R., Boiarynova K. O., Kinchiev O. I. Identyfikatsiia rehionalnykh vidminnostei enerhetychnoho rozvytku ukrainy za dopomohoiu metodiv bahatovymirnoi statystyky. Aktualni problemy ekonomiky, obliku, upravlinnia ta prava v XXI stolitti : zb. tez dop. mizhnar. naukovo-prakt. konf., m. Cherkasy, 11 lystop. 2025 r. 2025. S. 8–12.

Publications.

1) Boiarynova K., Klymovych O., Kinchiev O. Analytical modeling of Ukraine's energy security taking into account regional determinants of innovative development. *Economic Analysis*. 2025. № 35(3). C. 308–322. URL: <https://doi.org/10.35774/econa2025.03.308>;

2) Shevchuk O., Klymovych O. Innovative Development of Ukraine in Conditions of Transformational Changes. *Economic Herald of the Donbas*. 2024. № 3 (77). C. 130–139. URL: [https://doi.org/10.12958/1817-3772-2024-3\(77\)-130-139](https://doi.org/10.12958/1817-3772-2024-3(77)-130-139).

Keywords: economic analytics, economic security, spatial modeling, strategic analytics, regional differentiation, strategic innovations, economic risks, scenario modeling.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	9
1 ТЕОРЕТИКО-МЕТОДИЧНІ ПІДХОДИ ДО ЕКОНОМІЧНОЇ АНАЛІТИКИ СТРАТЕГІЧНИХ ІННОВАЦІЙ У ПІДВИЩЕННІ ЕКОНОМІЧНОЇ БЕЗПЕКИ ЕНЕРГЕТИЧНОГО СЕКТОРУ	13
1.1 Теоретичні основи інновацій та економічної безпеки енергетичного сектору	13
1.2 Чинники та індикатори економічної безпеки енергетичного сектору	22
1.3 Методичні підходи та інструментарій економічної аналітики інновацій енергетичного сектору на стратегічній основі.....	30
Висновки до першого розділу.....	42
2 ЕКОНОМІЧНА АНАЛІТИКА СТРАТЕГІЧНИХ ІННОВАЦІЙ У ЗАБЕЗПЕЧЕННІ ЕКОНОМІЧНОЇ БЕЗПЕКИ ЕНЕРГЕТИЧНОГО СЕКТОРУ	44
2.1. Діагностична аналітика впливу стратегічних інновацій на економічну безпеку енергетичного сектору.....	44
2.2 Кластерний аналіз енергетичного сектору регіонів України у розрізі взаємозв'язків стратегічних інновацій та економічної безпеки.....	54
2.3. Аналіз регіональних економетричних моделей економічної безпеки енергетичного сектору України.....	69
Висновки до другого розділу	81
3. РЕКОМЕНДАЦІЙНА СТРАТЕГІЧНА АНАЛІТИКА ІННОВАЦІЙ У ПІДВИЩЕННІ ЕКОНОМІЧНОЇ БЕЗПЕКИ ЕНЕРГЕТИЧНОГО СЕКТОРУ УКРАЇНИ	83
3.1 Розроблення аналітичного інструментарію оцінювання стратегічних інновацій для забезпечення економічної безпеки енергетичного сектору	83
3.2 Економічні рішення підвищення економічної безпеки енергетичного сектору на основі стратегування інновацій	97
3.3 Прогностична аналітика стратегічних інновацій та сценарне моделювання підвищення економічної безпеки енергетичного сектору	105
Висновки до третього розділу.....	119
ВИСНОВКИ.....	120
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	124
ДОДАТКИ.....	131

ВСТУП

Актуальність. Енергетична система України наразі перебуває на етапі безпрецедентної кризи. Значна кількість об'єктів критичної інфраструктури зазнала руйнувань або була цілком знищена внаслідок військових дій. Відновлення енергетичних потужностей є основою економічної безпеки, адже зникнення напруги в мережі спричиняє зупинку тисяч підприємств, а об'єкти інфраструктури не мають можливості стабільно працювати, що становить значні фінансові та соціальні виклики функціонування держави. В умовах постійних атак на енергетичну інфраструктуру у 2022 – 2024 роках дефіцит генеруючих потужностей у пікові періоди зумовлює потребу у розробленні сучасних методів оцінки впливу стратегічних інновацій, діагностики вразливостей та моделювання економічних втрат.

Однак паралельно з цим широкого розвитку та впровадження набувають цифрові інноваційні технології. Введення в експлуатацію інтелектуальних мереж, застосування систем прогнозування та використання аналітики великих даних – основні напрямки інноваційного розвитку енергетичного сектору. Усе це змінює підхід до підтримки високого рівня економічної безпеки. Сучасний інструментарій економічної аналітики дозволяє по-новому розглядати просторову неоднорідність енергетичних викликів, прогнозувати надійність електропостачання, знаходити ключові фактори впливу і будувати реалістичні сценарії відновлення. Україна гостро потребує інтегрованого аналітичного інструментарію, який поєднає регіональну, статистичну та прогнозну аналітику. Завдяки такому комплексному підходу можливе ефективне прийняття рішень у сфері економічної безпеки енергетичного сектору.

Поняття інновацій, економічної безпеки енергетичного сектору, формування стохастичних моделей функціонування енергетичного сектору є актуальними питаннями наукового дискурсу. Згідно до праць Г. В. Кошельок та Г. О. Пудичевої економічна безпека відповідає стану ефективного використання наявних ресурсів для забезпечення стабільного та гармонійного розвитку галузі. Стан захищеності полягає у синергії технологічних можливостей та управлінських стратегій для

ефективного безперебійного функціонування галузі. У своїх роботах Ю. М. Харазішвілі та Г. Л. Рябцев окреслили комплексний підхід до аналізу енергетичної системи. Українські вчені досліджували взаємодію інноваційних механізмів із безпековими чинниками. Міжнародні дослідницькі організації, включаючи Міжнародне енергетичне агентство розробили методології оцінки безпеки енергопостачання.

Зв'язок дослідження з науковими програмами, планами, темами. Магістерська дисертація виконувалась в Національному технічному університеті України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» відповідно до планів наукових досліджень кафедри економічної кібернетики за темою «Аналітика стратегічних інновацій у підвищенні економічної безпеки енергетичного сектору» (№ ДР 0123U101760). Роль автора полягає у систематизації досліджень аналізу стану економічної безпеки енергетичного сектору та впливу стратегічних інновацій на енергетичну систему, формуванні економетричного апарату для побудови моделей стійкості регіонів країни в умовах невизначеності.

Метою магістерської дисертації є розгляд теоретичних засад, розроблення та апробація методичних положень щодо аналітики стратегічних інновацій у підвищенні економічної безпеки енергетичного сектору України, формування обґрунтованих практичних рекомендацій щодо підвищення безпекової стійкості на цій основі.

Відповідно до поставленої мети було вирішено такі завдання:

- розкрити теоретичні основи стратегічних інновацій та економічної безпеки енергетичного сектору України;
- здійснити аналіз впливу інноваційних чинників та індикаторів на економічну безпеку енергетичного сектору;
- сформувати комплексну базу методичних підходів та інструментарію економічної аналітики інновацій енергетичного сектору на стратегічній основі;
- здійснити діагностичну аналітику впливу стратегічних інновацій на економічну безпеку енергетичного сектору;
- провести кластерний аналіз енергетичного сектору регіонів України у розрізі взаємозв'язків стратегічних інновацій та економічної безпеки;

- виконати аналіз регіональних економетричних моделей економічної безпеки енергетичного сектору України;
- розробити аналітичний інструментарій оцінювання стратегічних інновацій для забезпечення економічної безпеки енергетичного сектору;
- надати економічні рішення підвищення економічної безпеки енергетичного сектору на основі стратегування інновацій;
- виконати прогностичну аналітику стратегічних інновацій та сценарне моделювання підвищення економічної безпеки енергетичного сектору.

Об'єктом дослідження є процеси забезпечення економічної безпеки енергетичного сектору України шляхом впровадження стратегічних інновацій.

Предметом дослідження є теоретичні, методичні та прикладні положення, аналітики стратегічних інновацій у підвищенні економічної безпеки енергетичного сектору України та її регіонів.

Методи дослідження. З метою формування теоретичних положень функціонування енергетичного ринку України було застосовано методи індукції, дедукції та логічні узагальнення. Для оцінки тенденцій та стану енергетичної безпеки енергетичного сектору, а також впливу стратегічних інновацій на сектор використано методи економіко-статистичного аналізу. Задля формування бази даних та оцінки регіонально диференційованого індексу економічної безпеки застосовано методологію кластерного аналізу. Для визначення ключових факторів впливу використано метод головних компонент, а для аналізу просторових залежностей – інструментарій просторової економетрики, зокрема індекс Морана. Розроблення майбутніх траєкторій розвитку економічної безпеки енергетичного сектору під впливом впровадження стратегічних інновацій вимагало використання методів сценарного аналізу та економіко-математичного моделювання, які в подальшому дозволило оцінити поточний стан сектору та сформулювати дієві рекомендації.

Наукова новизна. Елементами наукової новизни магістерської дисертації є:

- 1) методичні положення діагностичної аналітики економічної безпеки, що ґрунтуються на застосуванні інтегрованої економіко-математичної моделі, яка враховує регіональні особливості, просторові залежності та сценарні фактори;

2) запропонований комплексний інструментарій аналітики стратегічних інновацій для підвищення стійкості енергетичного сектору, який охоплює такі елементи: просторова аналітика регіональних відмінностей, системна діагностика економічної безпеки енергетичного сектору, рекомендаційна аналітика підвищення стійкості функціонування енергетичної інфраструктури у регіональному розрізі.

Практичне значення отриманих результатів. Практична значущість результатів полягає в тому, що розроблені моделі й пропозиції можуть бути застосовані для оцінки стану економічної безпеки енергетичного сектору як у масштабах країни, так і окремого регіону чи області, визначення стратегічних пріоритетів у впровадженні інновацій та модернізації електромереж, для розроблення стратегій, які сприятимуть посиленню економічної безпеки енергетичної системи України.

Апробація результатів магістерської дисертації: Результати магістерської дисертації представлено на конференції з публікацією тез доповіді: Климович О. Р., Бояринова К. О., Кінчєв О. І. Ідентифікація регіональних відмінностей енергетичного розвитку України за допомогою методів багатовимірної статистики. *Актуальні проблеми економіки, обліку, управління та права в XXI столітті* : зб. тез доп. міжнар. науково-практ. конф., м. Черкаси, 11 листоп. 2025 р. 2025. С. 8–12.

Публікації. За результатами дослідження було опубліковано 2 фахові статті у наукових журналах категорії Б:

1. Бояринова К., Климович О., Кінчєв О. Аналітичне моделювання енергетичної безпеки України з урахуванням регіональних детермінант інноваційного розвитку. *Економічний аналіз*. 2025. Т. 35, № 3. С. 308–322. URL: <https://doi.org/10.35774/econa2025.03.308>;

2. Шевчук О. А., Климович О. Р. Інноваційний розвиток України в умовах трансформаційних змін. *Економічний вісник Донбасу*. 2024. № 3 (77). С. 130–139. URL: [https://doi.org/10.12958/1817-3772-2024-3\(77\)-130-139](https://doi.org/10.12958/1817-3772-2024-3(77)-130-139).

1 ТЕОРЕТИКО-МЕТОДИЧНІ ПІДХОДИ ДО ЕКОНОМІЧНОЇ АНАЛІТИКИ СТРАТЕГІЧНИХ ІННОВАЦІЙ У ПІДВИЩЕННІ ЕКОНОМІЧНОЇ БЕЗПЕКИ ЕНЕРГЕТИЧНОГО СЕКТОРУ

1.1 Теоретичні основи інновацій та економічної безпеки енергетичного сектору

Сьогодні Україна перебуває на етапі трансформаційних змін. Сучасні виклики в умовах військових дій спричиняють дестабілізацію економічного сектора країни. В умовах глобалізації та цифровізації питання економічної безпеки та впливу на неї інноваційної діяльності набуває особливої актуальності.

Головна передумова ефективного функціонування будь-якої компанії, галузі чи навіть держави є інноваційна діяльність, адже інновації завжди відігравали ключову роль у розвитку всіх секторів економіки.

Поняття «інновацій» трактується більшістю вчених не лише як створення нових розробок у галузях економіки, але як й пошук креативних рішень у напрямках фінансової активності, організаційної діяльності, технологічного та наукового прогресу для вирішення існуючих проблем чи формування покращених концепцій розвитку, щоб відповідати поточним викликам у обраних галузях [1].

Різні наукові школи трактували поняття «інновації» залежно від контексту його застосування. Так, класичний підхід економічної школи, основним представником якої є Шумпетер, визначає інновацію як рушій креативного руйнування встановлених шаблонів. Відповідно до праць науковця, інновації – нові комбінації виробничих факторів, які спрямовані на отримання сучасних методів виробництва, освоєння нових ринків, створення новітніх продуктів за допомогою доступних джерел сировини або введення нової організаційної моделі [2].

Соціологічна школа та теорії дифузії інновацій зосереджуються на процесі розподілу нових ідей та технологій через комунікацію між новаторами та іншими соціальними групами [3].

В той час українська школа зміщує фокус ролі інновації в аналізі, заданому Пітером Друкером, як інструменту підприємців для створення та введення змін у новій сфері послуг чи напрямку бізнесу [4].

У Законі України «Про інноваційну діяльність» «інновації – новостворені (застосовані) і (або) вдосконалені конкурентоздатні технології, продукція або послуги, а також організаційно-технічні рішення виробничого, адміністративного, комерційного або іншого характеру, що істотно поліпшують структуру та якість виробництва і (або) соціальної сфери» [5].

П. Микитюк вважає, що поняття інновації включає чотири основні компоненти – це креативність, уміння створювати сучасні ідеї, формувати стратегії розвитку, а також застосувати ідеї новизни з точки зору ефективного розвитку підприємства [6].

Згідно з посібником Осло «інновація — це вдосконалений або цілком новий процес, продукт чи їхня комбінація, що суттєво відрізняється від раніше створених і доступних споживачам» [7].

Н. Тимошенко і М. Шабанова присвятили свої дослідження питанням розвитку інновацій та інноваційної діяльності в період діджиталізації національної економіки. Автори здійснювали аналіз інноваційної діяльності з точки зору обсягів фінансування та темпів інвестиційної активності. Науковці зауважили, що необхідно розвивати цифровізацію інноваційного сектору, а відсутність достатнього фінансування спричиняє спад інтересу до інноваційних розробок [8].

Загалом основною ідеєю інновації є зростання галузі чи підприємства. Інновації вимагають створення нових напрямів роботи на основі нових ідей і технологій. Ключовою метою є зменшення фінансових та виробничих втрат. Сьогодні основний фокус інновацій змістився у бік технологій, критично важливих для оборони та відновлення держави. Чільне місце серед таких напрямків інноваційної діяльності займають технології у галузі енергетики, які дозволяють підтримувати енергетичний баланс держави

Трансформація енергетичної системи охоплює комплекс взаємопов'язаних процесів, що мають економічну, соціальну, інноваційну, політичну та екологічну складові. Загалом ключовими напрямками цієї трансформації є диверсифікація джерел енергії, підвищення ефективності використання ресурсів та розвиток

альтернативної енергетики, що сприяє зміцненню економічної безпеки та зменшенню залежності від традиційних енергоресурсів [9; 10].

Згідно з дослідженнями Т. Бондара, Л. Сагела та В. Тимошенко, інновації в енергетиці являють собою сукупність процесів, що дають змогу розширити можливості використання енергоресурсів, підвищити надійність енергетичних систем та скоротити втрати, пов'язані з виробництвом, передачею та розподілом енергії на політичному, екологічному та економічному рівнях [11].

Такі інновації тісно пов'язані зі змінами організаційних, технологічних, управлінських та транзакційних факторів. Реалізація інноваційних перетворень потребує усунення бар'єрів, що стримують розвиток нових підходів до функціонування енергетичного сектору.

Роль інновацій полягає у підтримці сталого розвитку енергетичного сектору та у здатності трансформувати наявні проблеми, які визначаються як виклики сучасного періоду, у чинники підвищення ефективності та конкурентоспроможності енергетичної галузі (рис. 1.1) [11].



Рисунок 1.1 – Ключові напрями інноваційної діяльності в енергетичному секторі

Джерело: розроблено автором на основі [12; 13; 14]

Серед основних напрямів інноваційного розвитку енергетичної системи пріоритетними є підвищення технологічної оснащеності та рівня цифровізації шляхом упровадження розумних електричних мереж (Smart Grid), систем накопичення енергії, а також модернізації ресурсної бази виробництва електричної енергії з акцентом на використання відновлюваних джерел енергії.

Інноваційний розвиток також передбачає формування нових організаційних моделей, зокрема більш конкурентоспроможної та прозорої системи функціонування енергетичного ринку, а також цифровізацію процесів управління та взаємодії між його учасниками. Щодо ринкових моделей, доцільним напрямом інновацій є створення умов для безперешкодної та ефективної співпраці між учасниками ринку електричної енергії. Наразі в Україні функціонує ринок двосторонніх договорів, який забезпечує такі можливості взаємодії.

У контексті екологічних інновацій визначальними є «зелений перехід» та процеси декарбонізації, оскільки вони сприяють зменшенню енергетичної залежності від викопних традиційних джерел, підвищують гнучкість енергосистеми та створюють передумови для сталого розвитку.

Загалом інновації у енергетичному секторі формують передумови для стійкого зростання та розвитку енергетично ощадливих технологій на основі сучасних концепцій сталого розвитку. Ціль впровадження таких ідей полягає у підвищенні енергонезалежності та зниженні фінансового тиску на всіх учасників ринку в умовах складної безпекової ситуації. Отже, питання економічної безпеки енергетичного сектору є критично важливим для подальшого дослідження та аналізу.

Економічна безпека держави є пріоритетним напрямом досліджень, адже вона впливає на формування цільових принципів функціонування систем державного апарату, промисловості, соціальної сфери та геополітичних інтеграційних процесів.

Поняття економічної безпеки є основою розвитку держави та підтримки її стабільності. Згідно з працею П. Стеценка, економічна безпека є складовою більш глобальної національної безпеки держави. Серед інших складових національної

безпеки виокремлюють політичну, інституційну, інформаційну, культурну, оборонну та інші види, що забезпечують фізичних та юридичних осіб необхідним рівнем захищеності (рис. 1.2) [12].

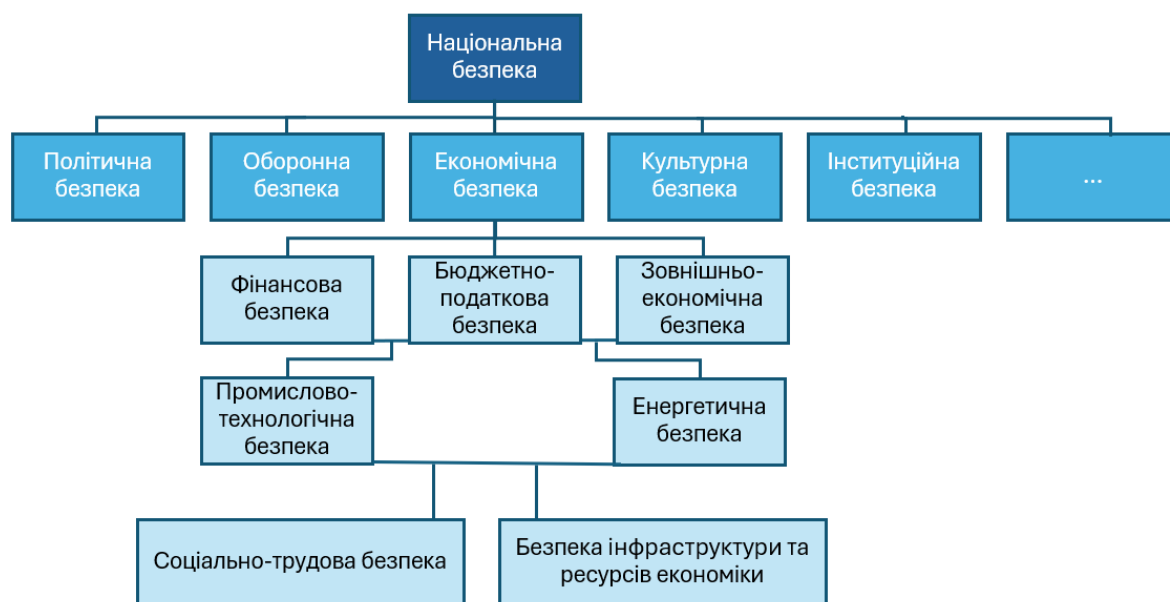


Рисунок 1.2 – Класифікація складових національної та економічної безпеки держави

Джерело: розроблено автором на основі [12; 13; 14]

Економічна безпека є важелем, що визначає рівень добробуту мільйонів українців. Згідно Молдована О. О. існує шість основних підходів до визначення терміну «економічна безпека». Кожен із них передбачає різний погляд на тлумачення поняття, аналізуючи його з точки зору ресурсного потенціалу, протекціоністської направленості чи здатності підтримувати основні умови для нормального функціонування учасників, а точніше суб'єктів господарювання і держави в цілому. У межах дисциплінарного підходу економічна безпека держави є спільним баченням науковців на її автономність з точки зору ухвалення рішень. Синергія у питанні визначення економічної безпеки підкреслює доцільність цілеспрямованої діяльності для досягнення стану стабільності функціонування [13; 15; 16; 17].

Держава є основним гарантом права на економічну безпеку та інші складові національної безпеки. Об'єктом безпеки є окрема одиниця, чия діяльність та умови

функціонування піддаються безпосередньому впливу чинників формування безпеки. Таким чином, об'єктом безпеки може виступати громадянин певної держави (як особистість), підприємство, концерн, галузь господарства, держава чи альянс [12].

Для підтримки тривалого стану безпеки критично необхідним є формування органів державної влади, які забезпечуватимуть дотримання нормативно-правової бази для підтримки позитивного вектору державної політики. Тому ключовим питанням є створення інституційного органу, який би відповідав за регулювання діяльності суб'єктів господарювання. Таким чином завдяки створеним законодавчим нормам економічні агенти чітко розуміли б межі їхньої правомірної діяльності у контексті міжорганізаційної співпраці.

Економічна безпека в Україні регулюється на законодавчому рівні як надзвичайно важлива складова національної безпеки. Наразі існує окремий орган влади – Бюро економічної безпеки – який відповідає за захист економіки країни. Серед інших напрямків його діяльності є протидія економічним злочинам, зокрема ухилення від оподаткування чи відмивання коштів фізичними та юридичними особами. Крім того, в Україні циклічним є затвердження Стратегії економічної безпеки, яка визначає напрями державної політики на всіх рівнях діяльності країни як суверенної одиниці [15; 16; 18; 19].

Основними принципами економічної безпеки згідно М. Копитко та Д. Заверухи є:

- підпорядкування законодавчим нормам та постановам для відповідності курсу державної політики;
- відповідність оперативності здійснення заходів стимулювання економічної забезпеченості імовірним чи вже існуючим викликам розвитку економіки країни;
- пріоритизація та ієрархічність структури підтримки економічної безпеки з огляду на актуальні інтереси державного апарату;

- дотримання основних норм безпеки громадян держави, що є першочерговим завданням у разі настання кризової ситуації, яка загрожує економічній безпеці;
- реалізація заходів врегулювання загроз економічній безпеці, здійснена лише після усестороннього аналізу потенційного впливу такої діяльності на суб'єкти господарювання [20].

Принципи економічної безпеки можуть бути реалізовані виключно у випадку виконання функцій економічної безпеки (рис. 1.3).

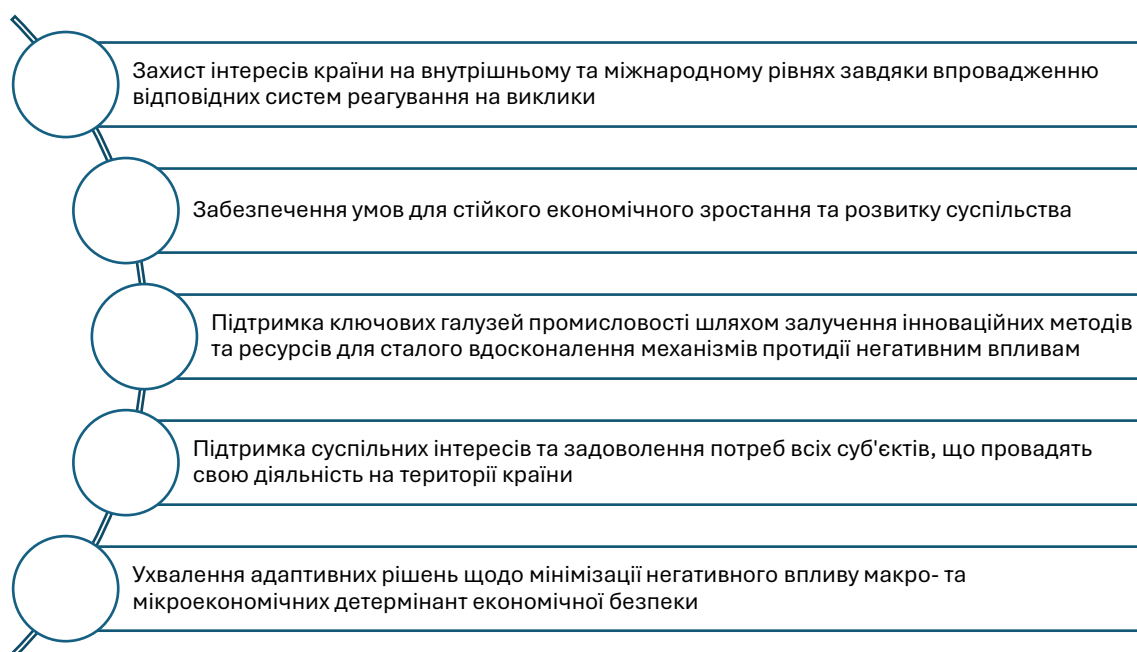


Рисунок 1.3 – Функції економічної безпеки держави

Джерело: розроблено автором на основі [20]

Зважаючи на те, що економічна безпека може бути розглянута у розрізі різних галузей, в умовах активних військових дій детальніше доцільно проаналізувати енергетичний сектор. Економічна безпека енергетичного сектору, як і безпека будь-якого іншого сектору, формується на основі принципів та завдань, що дозволяють підтримувати достатній рівень захищеності суб'єктів господарської діяльності та підтримки розвитку галузі.

Структура економічної безпеки енергетичного сектору формується на чотирьох основних показниках, визначених Міжнародним енергетичним агентством:

- доступність енергоресурсів,
- прийнятність відносно сучасних екологічних норм,
- надійність та стійкість енергосистеми,
- технологічність та ефективність виробничих потужностей [21].

Додатковими елементами є нормативно-правове регулювання, інвестиційна безпека та диверсифікація виробництва [21].

Спираючись на базові поняття економічної безпеки енергетичного сектору, доцільно розглянути вплив інновацій для підвищення надійності, безпеки та підтримки конкурентоспроможного середовища.

Впровадження інновацій дає змогу підвищити доступність наявної електричної енергії для споживачів. Пріоритетними напрямками є встановлення сучасних сонячних панелей, вітрових турбін, технології отримання енергії з біомаси тощо. Це дозволяє розширити енергозабезпечення суб'єктів господарювання навіть у найбільш віддалених регіонах країни, де традиційні джерела енергії відсутні або важкодоступні[22].

Іншим вектором підтримання високого рівня доступу до електричної енергії є використання систем зберігання енергії, теплових акумуляторів, механічних накопичувальних пристроїв тощо. Подані енергетичні рішення відображають поточні суспільно-соціальні тренди в поєднанні із екологічною відповідальністю для формування високого рівня економічної безпеки сектору [23].

Впровадження заходів з акумулювання енергії дозволяє підвищити надійність мережі, що гостро стоїть на порядку денному в сучасних реаліях українського енергосектору. Стійкість системи у разі знищення виробничих потужностей впливає на зниження показника економічної безпеки всієї країни, тому побудова установок як зберігання, так і розподіленої генерації слугує каталізатором енергонезалежності регіонів держави [24].

Підвищення енергоефективності та енергозбереження дозволяє оптимізувати витрати енергії та сформувати саморегульований енергетичний баланс, що, у свою чергу, знижує залежність від зовнішніх енергетичних систем.

Важливою умовою підвищення рівня економічної безпеки є цифровізація та автоматизація виробництва і розподілу електричної енергії. Впровадження ефективних інструментів, зокрема, розумних (Smart) мереж та створення розумних міст, які мають можливість саморегулюватись та бути фінансово й технологічно незалежними у загальній системі держави, формуючи так звані "острови економічної незалежності" [24].

Водночас, впровадження інновацій з метою підвищення економічної безпеки енергетичного сектору стикається з низкою бар'єрів, що перешкоджають розвитку енергетичного сектору. Це нівелює позитивний вплив, який могли б дати інновації для поліпшення операційних бізнес-моделей компаній, що функціонують на ринку.

Основною проблемою, згідно з науковцями, є негативний вплив політики регулювання енергетичного сектору внаслідок необхідності виконання однієї з функцій економічної безпеки, а саме доступної енергетики для споживачів. Крім того, системи розподілу та передачі електричної енергії зазвичай є природними монополіями, тому регулювання ринку з боку держави стримує розвиток конкурентного середовища для підвищення економічної безпеки та диверсифікації джерел енергії. Також енергетичні компанії мають упередження щодо нововведень і не хочуть відходити від поточної прибуткової бізнес-моделі [25].

Що стосується технологічних бар'єрів, то інтеграція відновлюваних джерел енергії, особливо у мережі, вимагає модернізації інфраструктури. До того ж вона не формує базового потоку енергії та потребує відповідних кліматичних умов для функціонування, що обмежує надійність та технологічну здатність виробляти енергію відповідно до вимог споживачів.

Економічні бар'єри, зокрема високі початкові інвестиції для розробки нових джерел енергії чи систем збереження, негативно впливають на настрої інвесторів, які не прагнуть вкладати кошти в інновації, що не мають підтвердження своєї рентабельності, оскільки вони перебувають на етапі розробки. Малий і середній

бізнес, внаслідок недостатньої кредитної історії чи регулювання ринку, також не може самостійно розвивати та впроваджувати інновації, зокрема, виробництво обладнання чи технології для підвищення кібербезпеки та забезпечення економічної безпеки енергетичного сектору [25].

Загалом, ефективна енергетична галузь з точки зору економічної безпеки ґрунтується на інвестиціях як на основному джерелі формування можливостей для розвитку сектору. Ключовим стримувальним фактором для регіонів України наразі є військовий конфлікт, що впливає на нестачу кваліфікованих кадрів, недовіру споживачів до нових енергетичних рішень, непередбачуваність окупності вкладених інвестицій внаслідок можливості знищення чи часткового пошкодження технологічних нововведень [25].

Тому на даному етапі важливо провести аналітичне дослідження впливу стратегічних інновацій на забезпечення економічної безпеки енергетичної галузі регіонів України в умовах глобальних трансформаційних змін.

1.2 Чинники та індикатори економічної безпеки енергетичного сектору

Залишаючись ключовим фактором впливу на розвиток національної економіки, енергетичний сектор значно залежить від різноманітних екзогенних та ендогенних чинників. Серед них перспективними і найбільш впливовими є, зокрема, економічні, регуляторні та інституційні, техніко-правові, фінансові, геополітичні тощо (рис. 1.4).

Одним із найбільш впливових зовнішніх факторів на стан економічної безпеки енергетичного сектору є тривалі військові дії та окупація частини територій. Повномасштабна війна в Україні впливає на безпосереднє функціонування ринків енергетики. І оскільки внаслідок неї спостерігаються значні руйнування критичної інфраструктури та виробничих спроможностей, втрата доступу до яких зумовлена окупацією частини території України, енергетичний сектор перебуває на кризовому етапі.

Зовнішні фактори	Внутрішні фактори	Інші фактори
• Геополітичні • Військові дії та окупація частини територій • Залежність від імпорту палива • Кліматичні умови • Економічні • Коливання світових цін на енергоносії • Валютні курси та інфляція • Міжнародна фінансова підтримка • Міжнародні регуляторні • Вимоги Енергетичного Співтовариства • Стандарти Європейського зеленого курсу • Вимоги МАГАТЕ	• Інфраструктурні • Фізичний знос обладнання • Обмежені можливості логістики • Застарілі лінії електропередачі • Структурні трансформації • Регуляторні • Державне тарифне регулювання • Податкове навантаження • Фінансові • Обмежений доступ до інвестицій • Високий рівень боргового навантаження • Зростаюча кредиторська заборгованість	• Зниження споживання внаслідок економічної кризи та негативної демографічної тенденції • Кібератаки на критичну інфраструктуру • Неефективне управління та недостатність ретроспективного аналізу розвитку ринку

Рисунок 1.4 – Фактори інноваційного впливу на економічну безпеку енергетичного сектору

Джерело: сформовано автором

Залежність від імпорту палива в Україні за останні 15 років є одним із найбільш впливових чинників на економічну безпеку енергетичного сектору. Наразі працює лише один із шести великих нафтопереробних заводів України, а близько 70% споживання нафтопродуктів припадає на імпортований ресурс. Завдяки потенційному завантаженню Дрогобицького нафтопереробного заводу можливе скорочення імпортової залежності, водночас в межах повномасштабного вторгнення інвестиції у нафтопереробні потужності є обмеженими. Шляхом скорочення імпорту нафтопродуктів можливість економії коштів від виробництва ресурсу в Україні становитиме до 3 мільярдів гривень на рік. До того ж, відновлення роботи великих нафтопереробних заводів надасть можливість для працевлаштування близько півтори тисячі українців і принесе додатковий приплив коштів у ВВП в розмірі до 17 мільярдів гривень за п'ять років. Таким чином, економічна безпека енергетичного сектору України матиме більше шансів на інвестування, спираючись на вже успішні кейси використання заморожених раніше потужностей [26].

Ціни на енергоносії у найближчі роки будуть коливатися у відносно невеликих межах. Це є наслідком стабілізації попиту на зріджений природний газ, великих обсягів інвестицій та вже вкладених коштів у розвиток альтернативних джерел енергії, що стимулюватиме падіння ціни на енергоносії[27].

Водночас потенційно можливими напрямками є зростання фінансової ємності сучасних видів генерації електричної енергії із дорого вартісною розробкою вітрових установок офшорного типу. Зниження волатильності цін на електричну енергію у країнах Європи завдяки високим обсягам альтернативної енергії в енергетичному балансі дозволить нарощувати перетоки енергії у сусідні країни, підвищуючи комерційну вигоду [27].

Валютний курс та рівень інфляції є безпосередніми факторами впливу на економічну безпеку енергетичного сектору країни. Стабільний валютний курс дозволяє підвищувати конкурентоспроможність країни у ціновому сегменті електричної енергії [28].

Зокрема, інфляційні коливання, своєю чергою, можуть впливати на співпрацю із сусідніми країнами, що, з одного боку, послаблюватиме енергетичну незалежність, а з іншого — стимулюватиме синергію ринків енергії для підвищення міжрегіональної співпраці [28].

Механізм впливу валютного курсу на безпеку країни пов'язаний зі сталим економічним зростанням, що дозволяє уникати негативних наслідків у разі відсутності доступної кількості енергії у мережі завдяки можливостям проведення торговельних операцій із країнами-партнерами [28].

Міжнародна фінансова підтримка є основним каталізатором впливу на стан економічної безпеки енергетичного сектору, особливо в сучасних умовах інтеграції України до Європейського Союзу.

Основними можливостями забезпечення підтримки України є пряма фінансова допомога, багатостороннє партнерство, а також надання технологічних засобів для виробництва енергії, залучення «зелених» інвестицій та підтримка шляхом співпраці з інституційними платформами, такими як Фонд декарбонізації,

Фонд підтримки енергетики України, Європейський фонд реконструкції та розвитку, а також Європейський інвестиційний банк.

Сьогодні Міністерство енергетики України розробляє спрощені фінансові інструменти для підвищення економічної безпеки енергетичного сектору шляхом залучення партнерських інвестицій та інтеграції українського енергетичного сектору у відповідності до європейських енергетичних стандартів.

Євроінтеграція сьогодні потребує не лише технічного оснащення, але й співпраці у юридичному та ідеологічному секторах для зближення і введення української енергетичної системи у європейську. Для адаптивного реагування на виклики та переходу до стійкої співпраці в усіх напрямках економічної євроінтеграції Україна повинна врегулювати питання відповідності власної законодавчої бази стандартам ЄС [29].

Фактори глобального потепління та загальних кліматичних змін також впливають на кінцеве функціонування енергетичного ринку, адже зростання інтенсивності нетипових для території природних явищ, підвищення температури повітря, значні флуктуації температурних режимів у межах одного місяця ускладнюють прогнозування необхідних обсягів електроенергії.

Серед інших факторів впливу на економічну безпеку енергетичного сектору виділяють міжнародні регуляторні вимоги, зокрема, вимоги Енергетичного Співтовариства, Європейського зеленого курсу та вимоги МАГАТЕ.

Від 1 лютого 2011 року Україна є однією зі сторін, що підписала участь у Міжнародному енергетичному Співтоваристві Південно-Східної Європи. У межах Договору Україна повинна сприяти покращенню інвестиційного клімату енергетичного сектору, підвищенню його фінансової стабільності, стимулюванню торгівлі енергією у регіоні та вирішенню проблем, пов'язаних із узгодженням змін до законодавчих норм щодо сталого розвитку.

Шляхом імплементації Європейського законодавства Україна зобов'язана підвищувати власну ефективність енергетичного сектору з метою покращення економічної безпеки та впровадження Європейського зеленого курсу, що включає стратегію розвитку безпечної енергії на основі принципів нульового забруднення

довкілля, сталого, чистого та безпечного розвитку, енергоефективності та відновлення біорізноманіття [30].

Кожна зі складових плану енергетичного розвитку Європи до 2030 року розглядає напрями розширення доступу до чистої енергії шляхом декарбонізації системи та зниження викидів парникових газів до 25% від поточного стану. У порівнянні з цим, одним із найбільш потужних джерел енергії, яке не створює викидів парникових газів, і водночас є одним із найбільш небезпечних – ядерна енергія [31].

Згідно з вимогами МАГАТЕ, під якими підписалася Україна, прийнято, що використання ядерної енергії повинно бути лише для забезпечення потреб населення у споживанні електричної енергії. Сьогодні Статут МАГАТЕ є одним із визначальних в межах регулювання проблеми окупації Запорізької атомної електростанції. Саме тому нагляд МАГАТЕ використовується для підтримки належного стану станції в умовах нестабільних військових дій, що підтримує економічну безпеку енергетичного сектору [32].

Водночас високий ступінь фізичного й морального зношення більшості базових потужностей у системі електроенергії формує необхідність створення резервів та установок зі зберігання енергії для компенсації тимчасових невідповідностей між споживанням і можливостями вирівнювання генерації. З огляду на зниження промислової активності в східних регіонах та зростання споживання електроенергії населенням, виникає нестабільна структура з високим піковим навантаженням у ранкові та вечірні години залежно від дня й пори року, що негативно впливає на економічну безпеку галузі.

Саме тому виникає потреба в розвитку установок зі зберігання енергії та їх інтеграції в систему генерації для розміщення та швидкого відновлення потужностей, балансування генерації та формування стратегічних резервів. Достатні резервні потужності забезпечать у довгостроковій перспективі зниження тривалості відключень електроенергії та надання населенню достатніх обсягів необхідної генерації для підвищення економічної безпеки.

Переходячи до інших викликів енергетичного сектору, високої значущості набуває модернізація ліній електропередачі. Основна проблема полягає саме у застарілості системи та критичній необхідності заміни значної кількості магістральних ліній електропередачі, які наразі суттєво знижують пропускну здатність системи й підвищують обсяги втрат енергоресурсів. У підсумку це впливає на забезпечення енергетичного балансу електросистеми.

Економічна безпека енергетичного сектору значно залежить від можливостей здійснення логістичних процесів, адже це відображає доступність ресурсів для кінцевих споживачів та підтримки стійкого розвитку енергетичного сектору в умовах флуктуацій на ринках енергії.

Вплив тарифного регулювання на ціноутворення енергоресурсів, з одного боку, сприяє підвищенню економічної безпеки енергетичного сектору, надаючи виробникам енергії можливість використовувати доступні за ціною ресурси, зокрема для виробництва електричної енергії з природного газу.

Водночас це чинить тиск на видобувні компанії, а також на бюджет країни внаслідок необхідності кроссубсидіювання зниженого тарифного регулювання. Український державний бюджет є достатньо енергоємним. Валовий продукт, за різними оцінками, був на 20 і більше відсотків залежний від енергетичного сектору внаслідок зростаючого обсягу податків до 2022 року [33].

Водночас з початком повномасштабного вторгнення відбулося зниження податкового навантаження на виробників енергії, малі установки енергії, а також зниження мита на ввезення енергетичних ресурсів для підтримки стабільного виробництва електроенергії, що є одним із завдань функціонування економіки країни.

Нецільове використання бюджетних витрат, зокрема на підвищення оборонної забезпеченості країни, спричинило зниження видатків в інші сектори економіки, зокрема в енергетичний сектор. Це спричинило необхідність у нестандартних підходах щодо залучення інвестицій у енергетичну мережу.

Таким чином, необхідність зниження податкового навантаження, з одного боку, обґрунтована необхідністю підтримки енергетичних виробників України та

підвищення економічної безпеки сектору, але, з іншого боку, це сприяє неможливості здійснення конкурентоспроможної взаємодії із ринками сусідніх країн та зменшенню дохідної бази бюджету [34].

Рівень економічної безпеки значною мірою визначається обсягами інвестицій, зокрема спрямованих у новітні напрями розвитку. Наразі економіка України залишається обмеженою щодо залучення іноземних інвестицій, що зумовлено низьким рівнем довіри зовнішніх інвесторів до поточного стану економічної безпеки країни. Така ситуація стримує розвиток підприємницької діяльності та зменшує можливості для формування конкурентного ринкового середовища.

Загалом високий рівень інвестиційної привабливості держави є важливою передумовою розвитку енергетичного сектору та зміцнення його економічної безпеки.

Актуальним є питання практичного вдосконалення сектора енергетики, що відбивається в значних структурних трансформаціях. Саме “розумні” мережі є стійкою основою для інтеграції нових технологічних ресурсів виробництва та споживання енергії – сонячних панелей, електроавтівок, мікромереж тощо. Це стимулює покращену аналітику використання енергії споживачами та спрощує формування балансу між попитом та пропозицією. Застосування розумних технологічних мереж налаштовано агрегувати тисячі невеликих накопичувачів енергії, від окремих домашніх установок зберігання енергії до великих промислових споживачів, в єдину керовану одиницю – віртуальну електростанцію. Віртуальні електростанції підтримують систему балансу енергії, підвищуючи кінцеве число спожитої чи виробленої енергії під час непередбачуваних коливань у мережі, роблячи власників обладнання споживачами чи виробниками та збалансовуючи обсяг електроенергії у мережі.

Для розумних мереж доступна технологія Demand-Response, що дозволяє у реальному часі керувати споживанням енергії, тим самим покращуючи стан економічної безпеки енергетичного сектору.

У поєднанні із цифровізацією енергетичного сектору одним із впливових негативних факторів на економічну безпеку є можливість кібератак, оскільки внаслідок них виникають значні збої в електропостачанні. Також знижується кінцеве значення внутрішнього валового продукту, погіршується довіра економічних агентів до інноваційних методів розвитку енергетичного сектору.

Від початку повномасштабного вторгнення кібератаки на український енергетичний сектор лише посилюються, спричиняючи перебої в постачанні енергоресурсів і погіршуючи поточний стан економічної безпеки шляхом дестабілізації застосування інноваційних ресурсів для підтримки об'єктів критичної інфраструктури [35; 36].

В Україні, незважаючи на теоретико-методологічні підходи до побудови індикаторів економічної безпеки енергетичного сектору, зокрема інноваційних, бракує повного набору відкритих даних, які дозволили б сформулювати комплексний індекс економічної безпеки енергетичного сектору. Тому в більшості досліджень вдаються до аналізу скороченої вибірки показників, що дає можливість проводити проміжні оцінки та прогнозні моделі навіть за обмеженого обсягу інформації [37; 38].

Основними індикаторами, які відображають поточний рівень економічної безпеки енергетичного сектору, є показники економічної доцільності та регіонального впливу, зокрема показник валового регіонального продукту, який відображає стабільність функціонування енергетичних підприємств виробничої інфраструктури. Також важливим є фактор динаміки спостереження, адже аналітика економічної безпеки повинен здійснюватися не у статичному вигляді, а розглядатися більш глобально з точки зору часової зміни показників.

Основним індикатором економічної безпеки є тривалість відключень, тобто показник SAIDI, який відображає наявність енергії в мережі і ефективність вкладених інвестиційних потоків у розвиток економічної безпеки сектора.

Серед інших індикаторів ключовими є показник фізичної стійкості у вигляді кількості атак на енергетичну інфраструктуру, який є ключовим в умовах тривалого воєнного стану.

Також важливим чинником, що впливає на економічну безпеку, є наявність інноваційного та інвестиційного потенціалу країни, який відображається в індикаторах обсягу інвестицій у регіональну енергосистему, кількості інновацій в секторі та кількості встановлених розумних лічильників. Варто зауважити, що спираючись на дані про інновації, в середньому для всієї країни вони є єдиними у період певного року. Тому доцільно розглядати саме регіональний розподіл щодо кількості встановлених розумних лічильників: він дозволяє визначити, наскільки у регіональному розподілі ефективно використовуються впроваджені стратегічні інновації, впливаючи на показник тривалості відключень.

Загалом, індикатори економічної безпеки енергетичного сектору відображають якість та необхідність ключових інвестицій для збереження високого рівня незалежності, доступності та технологічної оснащеності енергетичного сектору.

1.3 Методичні підходи та інструментарій економічної аналітики інновацій енергетичного сектору на стратегічній основі

Для отримання обґрунтованих підстав оцінювання економічної безпеки енергетичного сектору держави в умовах воєнних загроз, деградації інфраструктури та регіональних диспропорцій необхідно реалізувати комплекс економіко-математичних, просторових та статистичних методів. Водночас в сучасній аналітичній практиці часто використовують комбіновані підходи, що передбачають попередню обробку даних, експлораторний аналіз, машинне навчання, просторову економетрику та сценарні підходи для прогнозування.

Насамперед, на початковому етапі збору даних для аналітики стратегічних інновацій потрібно виділити фундаментальну складову дослідницько-аналітичної програми, оскільки саме на цьому етапі формується інформаційна база, від якої залежить глибина, валідність та надійність подальших аналітичних висновків. З метою оцінювання впливу інновацій на енергетичну безпеку першочергово вирішується питання ідентифікації релевантних джерел даних, що відображають структурні, технологічні та інституційні зміни у відповідному секторі.

У межах дослідження стратегічних інновацій в енергетичній системі України спочатку необхідно сформувати набір макроекономічних даних, що репрезентують інноваційний потенціал та напрямки модернізації енергетичної галузі. Цей набір даних повинен включати показники:

- введення технологічних змін у енергетичному секторі,
- масштаби інноваційних проєктів,
- проведених та запланованих для реалізації відключень електричної енергії,
- інтенсивність використання технологій та інші показники.

Вказані вище дані мають описати виклики, стан впровадження інновацій та інституційні зміни у розвитку сектора в цілому. Значимість цих аспектів підтримується аналітикою регіональних відмінностей, що актуально з точки зору різноманітності диференціації доступу до ресурсів у регіонах.

Спосіб збору даних повинен бути здійснений шляхом інтеграції продуктів офіційних статистичних ресурсів. Для цього доцільним є використання постанови Державної служби статистики України, Міністерства енергетики, щоденні звіти НКРЕКП та звіти державних і приватних операторів систем розподілу. Дані ресурси опрацьовуються з урахуванням валідності та довготермінових тенденцій в енергетичній інфраструктурі для оцінювання впливу інвестиційної активності на стан економічної безпеки енергетичного сектору.

На першому етапі необхідним є аудит доступності даних для виявлення невідповідностей у структурі та потенційних зміщень, пов'язаних із явищами адміністративної специфіки. Виявлення нестачі та асиметрії інформації відповідає підходам нерівноправного покриття інформаційними ресурсами. Саме тут було здійснено перевірку даних на якість, включаючи основну перевірку через експертну оцінку та аналіз наявності даних.

Отже, на початковому етапі є ключовим збір та заповнення відсутніх даних для створення групи порівняння, яка є репрезентативною як для часткової вибірки структурних та технологічних рішень, так і для інституційних діяльностей, що характеризують регулюючі органи та інвестиції. Таким чином інтегрування різноманітних джерел даних сприятиме комплексній оцінці впливу інноваційних

рішень на економічну безпеку відповідно до сучасних вимог досліджень з економіки інновацій та енергостійкості. Перед побудовою моделей доцільною є стандартизована процедура очищення даних [39; 40].

З метою здійснення аналітики впливу стратегічних інновацій на економічну безпеку, науковці розраховували інтегральний показник економічної безпеки енергетичного сектору без врахування регіональної диференціації, що є критичним для визначення необхідності вкладання коштів інвесторами у конкретні регіони з подальшим прорахунком ефективності вкладених фінансових ресурсів у інноваційні програми підтримки енергетичного сектору в кризових умовах.

Регіональна диференціація дозволяє визначити і структурувати регіони за рівнем економічної привабливості, спираючись на показник економічної безпеки енергетичного сектору та оборонної безпеки регіонів для залучення інвестицій і впровадження інновацій.

Для регіональних змінних, для яких відсутні значення внаслідок об'єктивних факторів, пов'язаних із воєнними діями, тимчасовою окупацією окремих територій або критичними пошкодженнями енергетичної інфраструктури, необхідним для застосування методу середніх значень у межах регіону, що дозволяє мінімізувати викривлення та зберегти просторову структуру вибірки [41]:

$$x_{i,t}^* = \begin{cases} x_{i,t}, & \text{якщо } x_{i,t} \neq NaN, \\ \bar{x}_i, & \text{якщо } x_{i,t} = NaN, \end{cases} \quad (1.1)$$

де $x_{i,t}$ – значення показника для регіону i у період t ;

$\bar{x}_i$ – середнє значення по регіону;

NaN – пропущене значення.

Для змінної, що має однакове річне значення для всіх регіонів, застосовано [42]:

$$x_t^* = \bar{x}_t. \quad (1.2)$$

Якщо $\bar{x}_i$ неможливо оцінити, використовується глобальне середнє [41]:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (1.3)$$

З метою оцінювання ввідних даних використовуються базові статистичні показники, зокрема, було визначено середнє значення, медіану, стандартне відхилення, а також коефіцієнти асиметрії та ексцесу. Ці показники дозволяють оцінити центральну тенденцію, ступінь варіативності та форму емпіричного розподілу, що є критично важливим для подальших процедур кластеризації, регресійного аналізу та діагностики структурних особливостей даних.

Середнє арифметичне, яке відображає узагальнену оцінку рівня змінної, визначається за формулою:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i, \quad (1.4)$$

де x_i – окремі спостереження,

n – кількість здійснених спостережень [43].

Для підвищення стійкості оцінки центральної тенденції додатково розраховується медіана. Ступінь розсіювання спостережень відносно середнього значення оцінюється за допомогою вибіркового стандартного відхилення:

$$s = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}, \quad (1.5)$$

що є незміщеною оцінкою відповідного параметра генеральної сукупності [42].

Для аналізу форми розподілу змінних розраховувалися також показники асиметрії та ексцесу. Вибірковий коефіцієнт асиметрії, який характеризує відхилення розподілу від симетричного, визначається як [41]:

$$\text{Skewness} = \frac{n}{(n-1)(n-2)} \sum_{i=1}^n \left(\frac{x_i - \bar{x}}{s} \right)^3. \quad (1.6)$$

Коефіцієнт ексцесу, що описує ступінь «гостровершинності» або «плосковершинності» розподілу відносно нормального, задається формулою [41]:

$$(1.7)$$

$$\text{Kurtosis} = \frac{n(n+1)}{(n-1)(n-2)(n-3)} \sum_{i=1}^n \left(\frac{x_i - \bar{x}}{s} \right)^4 - \frac{3(n-1)^2}{(n-2)(n-3)}.$$

Зазначені статистичні характеристики є базовими для діагностики структури даних і визначення коректності застосування методів машинного навчання та економічного моделювання.

Для аналізу розкиду було введено метод міжквартильного розмаху, що використовується для ідентифікації статистичних аномалій:

$$IQR = Q_3 - Q_1, \quad (1.8)$$

$$\text{Нижня межа} = Q_1 - 1,5 \times IQR, \quad (1.9)$$

$$\text{Верхня межа} = Q_3 + 1,5 \times IQR, \quad (1.10)$$

де Q_1 – це 25-й персентиль тобто перший квартиль,
 Q_3 – 75-й персентиль[43].

Будь-яке значення, що виходить за встановлені розкидом межі, вважається статистичним викидом.

Застосування гістограм у поєднанні з ядерними оцінками щільності необхідно для дослідження форми емпіричного розподілу досліджуваних змінних. Це дозволяє отримати згладжену, непараметричну оцінку щільності розподілу, що є принципово важливим у контексті економічного аналізу, де дані можуть мати зміщення, багатoverшинність або важкі хвости. Математична формула ядерної оцінки щільності має такий вигляд:

$$\hat{f}(x) = \frac{1}{nh} \sum_{i=1}^n K\left(\frac{x - x_i}{h}\right), \quad (1.11)$$

де $K(\cdot)$ – гаусівське ядро;

h – параметр згладжування [44].

Для оцінки динаміки індикаторів стратегічних інновацій та безпеки енергетичного сектору доцільним для використання є базова трендова модель:

$$y_t = \beta_0 + \beta_1 t + \varepsilon_t, \quad (1.12)$$

де y_t – залежна від часу t змінна;

β_0 – фіксоване значення, яке є константою;

β_1 – коефіцієнти впливу часової змінної на залежну змінну;

ε_t , – незалежна випадкова величина [42].

Ця модель дозволяє визначити довгострокову тенденцію зміни показника в часі, що є критично важливим для енергетичної статистики, де спостерігається стійке зростання або зниження технологічних індикаторів[45].

Додатково доцільно застосовувати STL-декомпозицію, яка дозволяє виокремити трендову(T), сезонну(S) та залишкову(R) компоненти:

$$y_t = T_t + S_t + R_t, \quad (1.13)$$

оскільки багато енергетичних показників мають виражену сезонність. Метод STL рекомендований як оптимальний для економічних часових рядів із нерівномірною сезонністю[45].

Для оцінки ступеня взаємозв'язку між двома кількісними змінними важливим для використання є коефіцієнт кореляції Пірсона. Цей показник дозволяє кількісно оцінити лінійну залежність між змінними, що є необхідним на етапі кореляційного аналізу для виявлення потенційно взаємопов'язаних факторів. Коефіцієнт ρ_{xy} розраховується за формулою:

$$\rho_{xy} = \frac{\sum (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum (x_i - \bar{x})^2} \cdot \sqrt{\sum (y_i - \bar{y})^2}}, \quad (1.14)$$

де x_i – i -те спостереження змінної X ;

$\bar{x}$ – середнє значення змінної X ;

y_i – i -те спостереження змінної Y ;

$\bar{y}$ – середнє значення змінної [41].

Для забезпечення порівнянності даних і усунення впливу різних масштабів необхідним є здійснення стандартизації змінних z_i , яка дозволяє перетворити дані так, щоб вони мали середнє 0 та стандартне відхилення 1. Це є ключовим (1.15) підготовки для методів кластеризації та PCA:

$$z_i = \frac{x_i - \mu}{\sigma}$$

де x_i –значення змінної;

μ – середнє значення змінної;

σ – стандартне відхилення змінної [43].

Для аналізу даних з точки зору їхньої подібності за конкретними ознаками широко застосовуються різноманітні алгоритми кластеризації зокрема DBSCAN, метод К-середніх та ієрархічна кластеризація. Ієрархічна кластеризація хоча і дозволяє сформувати чітку структуру даних є достатньо складною для обчислень і чутливою до викидів. У випадку даного дослідження це може призвести до отримання недостатньо якісних результатів. Повертаючись до DBSCAN варто зауважити, що різна щільність даних може викривити сформовані кластери. Таким чином, найбільш адаптивним методом, що дозволить ефективно обчислення та інтерпретацію сформованих кластерів є метод К-середніх. Цей метод мінімізує суму квадратів відстаней кожного об'єкта до центроїда свого кластера.

У контексті аналітики впливу інновацій на економічну безпеку енергетичного сектору використання кластерного аналізу сприяє формуванню регіонів, подібних за значенням індикаторів економічної безпеки. У майбутньому це дозволить інвесторам детальніше проаналізувати доцільність вкладення інвестицій у інноваційну діяльність поданих регіонів.

Наразі кластеризація дозволить дослідити, наскільки відрізняються між собою кластери за показниками інноваційної діяльності, індикаторами економічної безпеки та можливостями для енергетичного зростання і розвитку. Ця техніка дозволяє групувати регіони на основі їхньої схожості за характеристиками та внутрішньою структурою даних:

$$\min_{C_1, \dots, C_k} \sum_{j=1}^k \sum_{x \in C_j} \|x - \mu_j\|^2, \quad (1.16)$$

де C_j – j-й кластер;

μ_j – центроїд j-го кластера;

x – об'єкт у кластері;

$\|\cdot\|$ – евклідова відстань [45].

Для визначення оптимальної кількості кластерів доцільно застосувати метод “ліктя”, який базується на зміні внутрішньокластерній дисперсії при збільшенні числа кластерів [45].

Для оцінки якості кластеризації впроваджується аналіз коефіцієнта силуету, який вимірює, наскільки об’єкти добре відокремлені від інших кластерів та наскільки вони щільні у своєму кластері:

$$s = \frac{b - a}{\max(a, b)} \quad (1.17)$$

де a – середня відстань між об’єктом та іншими елементами кластера;

b – середня відстань між об’єктом та елементами найближчого іншого кластера;

s – коефіцієнт силуету [43].

Для зменшення розмірності даних і виявлення основних компонент можна використати метод головних компонент (PCA). Він дозволяє зберегти найбільш значущу інформацію про дисперсію даних при проєкції в менш просторовий простір:

$$Z = XW, \quad (1.18)$$

де X – матриця вихідних даних;

W – матриця власних векторів, обраних за найбільшими власними значеннями;

Z – матриця проєкцій даних на головні компоненти [44].

Для оцінювання просторової взаємодії між регіонами України та виявлення впливу географічного розташування на середню тривалість відключень споживачів, як важливого показника, що відображає ефективність впровадження інновацій в енергетичному секторі для підвищення економічної безпеки, пропонується використати комплексний просторово-статистичний підхід, що поєднує кілька взаємопов’язаних методів, зокрема:

- побудова географічної матриці ваг;
- розрахунок просторового лагу;
- тестування статистичної значущості впливу;

- оцінювання просторової автокореляції за індексом Морана;
- візуально-аналітичну інтерпретацію результатів.

Матриця ваг W вказує на силу взаємного впливу регіонів залежно від їхньої близькості та належності до кластерів. На основі цього поділу створюється матриця міжкластерних відстаней, яку потім необхідно перетворити у матрицю ваг за принципом оберненої пропорційності:

$$w_{ij} = \frac{(d_{max} - d_{ij} + 1)}{d_{max}}, i \neq j, \quad (1.19)$$

де d_{ij} – відстань між кластерами i та j ,

d_{max} – максимальна міжкластерна відстань [46].

Для забезпечення порівнянності впливу кожного регіону, матриця просторових ваг нормалізується за сумою ваг рядка:

$$W = \frac{w_{ij}}{\sum_j w_{ij}} \quad (1.20)$$

де W – нормалізована матриця просторових ваг;

w_{ij} – елемент матриці просторових ваг;

$\sum_j w_{ij}$ – сума ваг по j -му рядку [46].

Для кожного регіону формується просторовий лаг показника залежного показника, що враховує середньозважене значення цього показника у сусідніх регіонах:

$$W_y = \sum_j w_{ij} y_j. \quad (1.21)$$

де y_j – значення залежний показник у регіоні j ,

W_y – просторово зважений залежний показник для регіону i [46].

Для всієї території проводиться розрахунок індексу Морана (Moran's I), який вимірює рівень просторової концентрації подібних значень залежної досліджуваної змінної:

$$(1.22)$$

$$I = \frac{N}{S_0} \cdot \frac{\sum_i i_j \sum_j w_{ij} (x_i - \bar{x})(x_j - \bar{x})}{\sum_i (x_i - \bar{x})^2},$$

де N – кількість регіонів;

$S_0 = \sum_i \sum_j w_{ij}$ – сумарна вага матриці просторових зв'язків [46].

Для оцінки впливу незалежних факторів на основний залежний показник використовується модель найменших квадратів. Модель дозволяє кількісно оцінити вплив кожного чинника та перевірити статистичну значущість:

$$y_{it} = \beta_0 + \beta_1 x_{1,it} + \dots + \beta_k x_{k,it} + \epsilon_{it} \quad (1.23)$$

де y_{it} – значення залежної змінної для конкретного регіону у певний час;

$x_{k,it}$ – значення k -го незалежного чинника для певного регіону у певний час;

β_k – коефіцієнт регресії для k -го чинника;

ϵ_{it} – випадкова похибка [43].

Вектор параметрів β визначається за методом найменших квадратів за допомогою мінімізації суми квадратів залишків:

$$\beta = (X'X)^{-1}X'y, \quad (1.24)$$

де X – матриця спостережень;

y – вектор значень залежної змінної [44].

Стандартні перевірки зазвичай мають включати мінімально тест Бройша-Пагана на гетероскедастичність, тест Дарбіна-Уотсона на автокореляцію, тест Ярке-Бера на нормальність залишків та перевірку мультиколінеарності через VIF.

Коефіцієнт детермінації (R^2) визначає якість відповідності регресійної моделі, її пояснювальної здатності:

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}, \quad (1.25)$$

де y_i – фактичні значення змінної;

$\hat{y}_i$ – передбачені значення за побудованою моделлю;

$\bar{y}$ – середнє значення залежної змінної [46].

Скоригований коефіцієнт детермінації використовується для попередження перенавчання модулі, враховуючи кількість пояснювальних змінних у моделі.

F-тест дозволяє визначити загальну значущість моделі:

$$F = \frac{R^2/k}{(1 - R^2)/(n - k - 1)}, \quad (1.26)$$

тест перевіряє гіпотезу $H_0: \beta_1 = \beta_2 = \dots = \beta_k = 0$ щодо рівності всіх коефіцієнтів регресії нулю, за винятком вільного члена [43].

t-тест дозволяє оцінити значущість певних коефіцієнтів регресії:

$$t_j = \frac{\hat{\beta}_j}{SE(\hat{\beta}_j)}, \quad (1.27)$$

де $SE(\hat{\beta}_j)$ – стандартна помилка оцінки обраного параметра [43].

Показник інфляції дисперсії (VIF) визначає наявність мультиколінеарності:

$$VIF_j = \frac{1}{1 - R_j^2}, \quad (1.28)$$

де R_j^2 – коефіцієнт детермінації для регресії x_j [43].

Тест Бройша-Пагана аналізує виконання гіпотези про гомоскедастичність залишків:

$$LM = n \cdot R_{aux}^2 \sim \chi^2(k), \quad (1.29)$$

де R_{aux}^2 – детермінація допоміжної регресії квадратів залишків на пояснювальні змінні [43].

Робастні стандартні помилки застосовуються за умови порушення гомоскедастичності [45]:

$$\widehat{Var}_{robust}(\hat{\beta}) = (X'X)^{-1} \left(\sum_{i=1}^n x_i' x_i \hat{u}_i^2 \right) (X'X)^{-1}. \quad (1.30)$$

Для визначення автокореляції залишків використовується тест Дарбіна-Вотсона [45]:

$$DW = \frac{\sum_{i=2}^n (\hat{\varepsilon}_i - \hat{\varepsilon}_{i-1})^2}{\sum_{i=1}^n \hat{\varepsilon}_i^2}.$$

Для аналізу нормальності розподілу залишків застосовується тестування Jarque-Bera:

$$JB = \frac{n}{6} \left(S^2 + \frac{(K - 3)^2}{4} \right) \sim \chi^2(2), \quad (1.32)$$

де S – коефіцієнт асиметрії;

K – коефіцієнт ексцесу [41].

Для врахування просторових взаємозв'язків використовують просторові моделі. Просторова авторегресійна модель (SLM) має вигляд:

$$y = \rho W y + X \beta + \epsilon, \quad (1.33)$$

де ρ – коефіцієнт просторової залежності;

$W y$ – просторовий лаг залежної змінної;

X – матриця незалежних змінних;

β – вектор коефіцієнтів [47].

Просторова модель помилок (SEM) включає просторову залежність у залишках:

$$y = X \beta + u, u = \lambda W u + \epsilon, \quad (1.34)$$

де λ – коефіцієнт просторової автокореляції залишків;

u – просторово залежні залишки;

ϵ – випадкова похибка [47].

Для оцінки точності прогнозів доцільними до застосування є метрики: середня абсолютна помилка (MAE), корінь середньоквадратичної помилки (RMSE) та середня абсолютна відносна помилка (MAPE) [47]:

$$MAE = \frac{1}{n} \sum |y - \hat{y}|. \quad (1.35)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum (y - \hat{y})^2}. \quad (1.36)$$

$$MAPE = \frac{100}{n} \sum \frac{|y - \hat{y}|}{y}. \quad (1.37)$$

Використання обраних методів відповідає сучасним підходам емпіричних досліджень у сфері економічної безпеки та аналітики стратегічних інновацій.

Описані методи дозволяють здійснити комплексну діагностику особливостей структури даних, виявити приховані закономірності в часових рядах і побачити форму їх розподілу. Крім того, просторовий підхід і кореляційний аналіз допомагають зрозуміти факторологічні взаємозв'язки між регіонами та змінними. Загалом, описані методи створюють основу для підготовки даних до подальшого застосування кластерних моделей, як лінійних регресій, і забезпечують надійну базу для комплексної економічної аналітики. Проведення поданого аналізу дозволить оцінити ефективність впровадження стратегічних інновацій у регіонах України відповідно до їхнього розподілу за рівнем економічної безпеки енергетичного сектору. Використання таких методів забезпечить всеосяжний аналіз функціонування енергетичного сектору в умовах воєнного стану та стане підґрунтям для подальших досліджень у галузі аналізу впливу стратегічних інновацій на економічну безпеку з точки зору потенційних можливостей іноземних інвестицій у розвиток енергетичного сектору України.

Висновки до першого розділу

За результатами першого теоретичного розділу встановлено, що інновації є основою економічної безпеки енергетичного сектору країни. Поняття інновації передбачає створення нових або поліпшених послуг чи продукції для ефективного розвитку галузі. Основною ідеєю трансформації економічної системи є використання та напрацювання інноваційної діяльності для розвитку енергетичного сектору в питаннях економічної безпеки. Економічна безпека – це пріоритетний напрям досліджень як один із вагомих складових національної безпеки. Держава гарантує забезпечення економічної безпеки всім її суб'єктам.

Основними принципами економічної безпеки є підпорядкування верховенству права, оперативність, якість та пріоритизація заходів стимулювання економічної забезпеченості. Реалізація заходів щодо врегулювання загроз та дотримання норм безпеки громадян є ключовими імперативами державної політики. Основними показниками, які визначають економічну безпеку енергетичного сектору, є доступність ресурсів, надійність та стійкість

енергосистеми, її ефективність та здатність до використання сучасних норм розвитку. Основними бар'єрами, які постають перед економічною безпекою енергетичного сектору, є високі фінансові вкладення, технологічні та соціальні упередження. Загалом ключовим фактором, що стримує розвиток енергетичної галузі України і, як наслідок, знижує економічну безпеку та обсяги вкладених коштів для створення інноваційних ресурсів, є військовий конфлікт.

Залишаючись ключовим напрямом розвитку економіки, енергетичний сектор наразі перебуває під впливом низки внутрішніх і зовнішніх факторів. Окупація частини територій, значна залежність від імпорту палива, зростання вартості іноземних енергоносіїв та інфляційні коливання чинять негативний вплив на кінцевий показник економічної безпеки.

Водночас інтеграція в європейський енергетичний простір, співпраця та залучення "зелених" інвестицій, впровадження цифрової трансформації в галузі системи розподілу електричної енергії в межах співпраці з країнами Південно-Східної Європи, дозволяє розвивати енергетичний сектор та впроваджувати сучасні інновації навіть у період воєнної кризи.

Рівень економічної безпеки значною мірою залежить від стійкості енергетичної системи, можливості інтеграції новітніх джерел та установок зберігання енергії. Водночас, незважаючи на енергомістку економіку, стан мереж розподілу електричної енергії є достатньо застарілим, а тому потребує модернізації в межах підвищення інвестування країн-партнерів в енергетичну систему України.

Основним індикатором економічної безпеки на сьогодні є тривалість відключень, який відображає стійкість енергетичної системи, ефективність впровадження інвестиційних потоків у розвиток галузі і ґрунтується на даних щодо інноваційної активності в регіонах країни.

Серед інших індикаторів можна визначити такі, що відображають стан регіональної диференційованості, зокрема, показник валового регіонального продукту, а також кількість встановлених розумних лічильників, яка вказує на інноваційний розвиток кожного із регіонів України, що є достатньо важливим в період трансформаційних змін сектору.

2 ЕКОНОМІЧНА АНАЛІТИКА СТРАТЕГІЧНИХ ІННОВАЦІЙ У ЗАБЕЗПЕЧЕННІ ЕКОНОМІЧНОЇ БЕЗПЕКИ ЕНЕРГЕТИЧНОГО СЕКТОРУ

2.1. Діагностична аналітика впливу стратегічних інновацій на економічну безпеку енергетичного сектору

У науковій концепції економічна безпека розглядається не як статичний стан, а як складна динамічна система, що забезпечує баланс між такими складовими:

- технологічною надійністю та якістю постачання;
- економічною доступністю та регіональним впливом;
- безпекою та стійкістю до зовнішніх потрясінь;
- інноваційним та інвестиційним потенціалом розвитку.

Таким чином, аналітика економічної безпеки енергетичного сектору потребує комплексної моделі, що агрегує детермінанти її формування.

У дослідженні доцільно зробити акцент на міжрегіональну гетерогенність, адже українські області подекуди суттєво відрізняються за економічними, соціальними, інфраструктурними та географічними індикаторами. У процесі аналізу економічної безпеки енергетичного сектору ці відмінності мають ключове значення – стан енергосистеми, ресурси, інвестиційний потенціал та інноваційна діяльність можуть суттєво різнитись в межах однієї країни. Такий підхід дозволяє виокремити виключно дієві інструменти підтримки регіонів, зокрема основні напрямки інноваційного інвестування та доцільність модернізації мереж, виходячи з кластерів регіонів із подібними проблемами. Таким чином, масив вхідних даних повинен сформувати повну панель спостережень для 25 регіонів. Період дослідження повинен охоплювати якомога сучасніші дані, водночас спиратись на історичний контекст. Таким чином дані за 2016–2024 роки дозволять забезпечити високу щільність вибірки та можливість аналізувати як просторову, так і часову відмінність.

Комплекс факторів впливу на економічну безпеку, який доцільно розглянути у дослідженні, повинен включати різномірні показники. Для зручності розуміння того, за яку категорію впливу на значення економічної безпеки енергетичного

сектору відповідає кожен окремий показник, наведено скорочену таблицю. До того ж, важливим є відображення інформації у тому вигляді, у якому вона буде використана для аналізу у середовищі програмування. Таким чином, здійснено перейменування показників для можливості їх використання на подальших етапах формування моделей та передачі даних в середовище програмування мовою Python (табл. 2.1). Повний лістинг коду програми відображено наприкінці роботи (Додаток А).

Таблиця 2.1 – Структура використаних у дослідженні даних

Фактор впливу на економічну безпеку енергетичного сектору	Назва змінної	Опис показника	Формат / Одиниця виміру
Економічна доцільність та регіональний вплив	region	Назва області України (включно з м. Київ)	текстовий
Фактор динаміки	year	Рік спостереження	2016–2024
Економічна безпека сектору	safety_index	Індекс безпеки енергетичного сектору (SAIDI)	хв/особу
Технічна надійність та якість постачання	planned_vs_actual_outages	Відсоткове співвідношення запланованих до загальних відключень	%
Фізична стійкість та безпека	attacks	Кількість атак на енергетичну інфраструктуру	кількість випадків
Економічна доцільність та регіональний вплив	grp	Валовий регіональний продукт	грн
Інвестиційний та інноваційний потенціал	smart_meter	Кількість встановлених «розумних» лічильників за областями України	одиниці
Інвестиційний та інноваційний потенціал	investment_region	Обсяг інвестицій у регіональну енергосистему	грн
Інвестиційний та інноваційний потенціал	innovations	Кількість інновацій у секторі	кількість

Джерело: розраховано та побудовано автором на основі даних [48; 49; 50; 51; 52; 53]

Для вивчення стратегічного впливу інновацій на економічну безпеку енергетичного сектору було обрано показник SAIDI(System Average Interruption Duration Index). Він виражає кількість хв. електроенергії, що щорічно втрачається споживачем у кожному регіоні, де відбуваються відключення електроенергії. Вибір його як індикатора стану безпеки енергетичного сектору полягає у гнучкості даного параметра. Він дозволяє проаналізувати надійність електропостачання, доцільність вкладених інвестицій, інноваційну оснащеність та економічну безпеку (рис. 2.1).

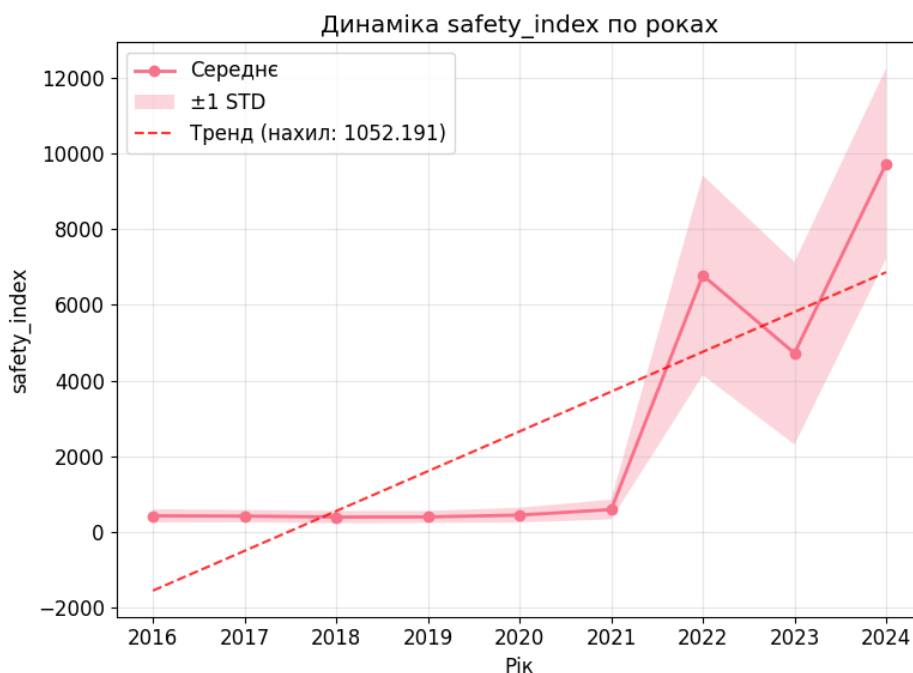


Рисунок 2.1 – Динаміка показника SAIDI за роками

Джерело: сформовано автором на основі даних [48; 49; 50; 51; 52; 53]

У даних, зібраних за регіонами, виявлено значну дисперсію, із середнім значенням 2593,8 хв. і стандартним відхиленням 3617,1, що вказує на різноманітність рівня надійності електропостачання. Загалом було 15 винятків, що становить 6,7 %, які в основному зосереджені в зруйнованих або менш розвинених регіонах з пошкодженою інфраструктурою.

Часовий тренд вказує на статистично значуще зростання (нахил $\approx +1052$, $p < 0,01$), що узгоджується з тенденціями збільшення аварійності та навантаження на мережі після 2022 року.

Спираючись на подану вище інформацію SAIDI доцільно обрати як основну залежну змінну, значення якої необхідно змодельовати шляхом застосування регресійних моделей, що включають низку незалежних факторів, які відповідають складовим економічної безпеки енергетичного сектору.

Інвестиції в інфраструктуру є головним каналом підвищення стійкості та адаптивності енергетичної системи. Інвестиції спрямовуються на модернізацію обладнання, зміцнення мереж, встановлення потужностей та цифровізацію. Енергетична інфраструктура є капіталомісткою, і її надійність прямо пропорційна

обсягу капіталовкладень у модернізацію, реконструкцію та розширення мережевого покриття (рис. 2.2).

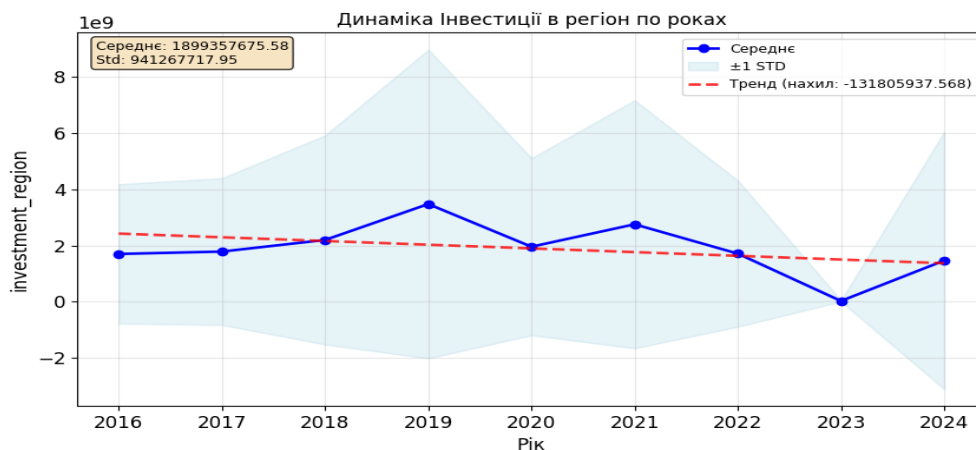


Рисунок 2.2 – Динаміка показника інвестицій в енергетичну інфраструктуру за роками

Джерело: сформовано автором на основі даних [48; 49; 50; 51; 52; 53]

Інвестиційна активність регіонів демонструє найбільшу варіативність серед усіх змінних: середнє значення становить 2,1 млрд грн, але максимальні значення (до 15,5 млрд грн у м. Києві) формують широку асиметрію розподілу. Виявлено, що дані місяць значні відмінності у фінансуванні інфраструктури між регіонами.

Незначущий спад за роками ($p > 0,3$) може свідчити про нестабільність інвестиційної політики та вплив зовнішніх факторів, зокрема дефіцити бюджетів, пріоритизація видатків на оборону після 2022 р. Сильний позитивний зв'язок між інвестиціями та валовим регіональним продуктом узгоджується з тим, що більш розвинені регіони акумулюють більші обсяги капітальних вкладень. Це підтверджує дослідження інших авторів про «нерівномірність інвестицій у мережеву інфраструктуру» у країнах Центральної та Східної Європи [54].

Показники інновацій і рівня впровадження smart-meter (розумних лічильників) відображають технологічну спроможність системи: здатність до дистанційного моніторингу, більш точного балансування попиту, швидшої діагностики й локалізації аварій, а також управління відновленням. Наукові аналітико-економічні дослідження показують, що введення в експлуатацію смарт-

лічильників підвищує здатність мережі до оперативного реагування та зменшує невизначеність щодо втрат. Отже, ці змінні – проксі-показники цифрової готовності і потенціалу зниження SAIDI через сучасні цифрові рішення (рис. 2.3).

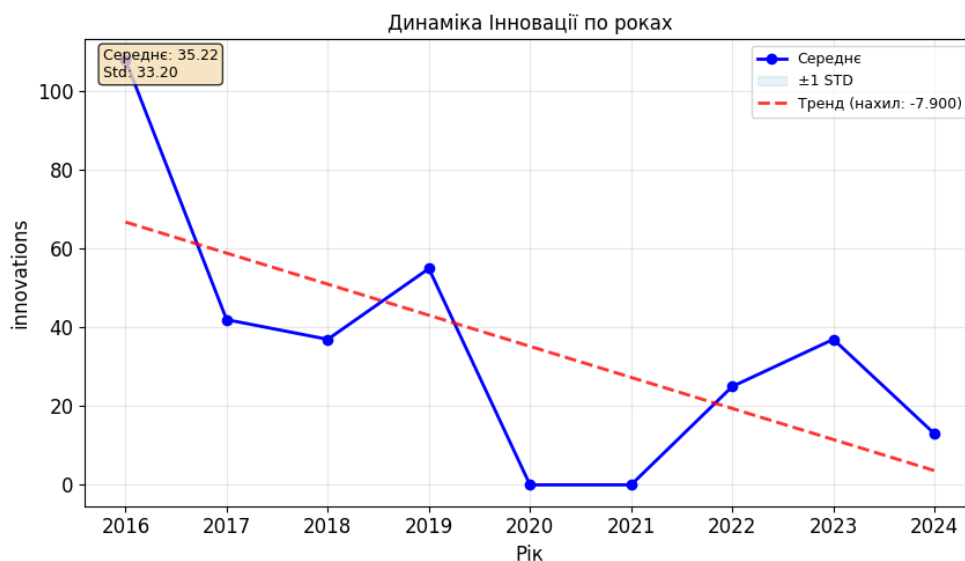


Рисунок 2.3 – Динаміка показника інновацій за роками

Джерело: сформовано автором на основі даних [48; 49; 50; 51; 52; 53]

Показник кількості введених інновацій варіюється від 0 до 108, що демонструє суттєві відмінності між регіонами у сфері технологічного розвитку. Загалом у межах країни показник є стаціонарним, що вказує на доцільність введення інновацій у всіх регіонах. Оскільки інновації є одним із ключових факторів економічної трансформації енергетичного сектору, доцільним є аналіз більш гнучкого показника – кількості розумних лічильників обліку електроенергії (рис. 2.4).

Значення кількості введених до експлуатації розумних лічильників демонструє значні відмінності між регіонами – від 0 до 538 тис. одиниць. Піки, ймовірно, пов'язані з пілотними проєктами цифрової трансформації в найбільш розвинених регіонах. Позитивна кореляція з ВРП свідчить про те, що регіони з вищим економічним потенціалом більше інвестують у технології.

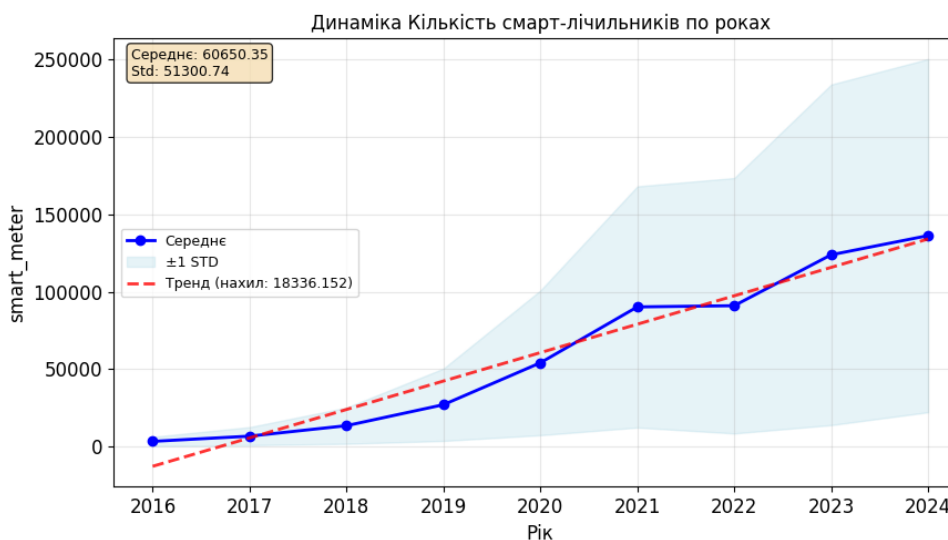


Рисунок 2.4 – Динаміка показника кількості введених до експлуатації розумних лічильників за роками

Джерело: сформовано автором на основі даних [48; 49; 50; 51; 52; 53]

Зважаючи на поточну безпекову ситуацію, доцільним є аналіз міжрегіональних перетоків енергії. Варто зауважити, що результативність міжрегіональних електричних перетоків в Україні є безпосередньо залежною від технічного стану ліній передачі електроенергії, ступеню автоматизації управлінських систем та рівня залученості виробництва і споживання енергії в межах регіональних кластерів. На сьогоднішній день спостерігається істотний фізичний та моральний знос електромереж. За даними НЕК «Укренерго», понад 60 % мереж передачі через повітряні лінії мають експлуатаційний термін понад 40 років, середній рівень зносу мереж розподілу електроенергії перевищує 70 %. Такий технічний стан регіональних мереж призводить до неможливості забезпечення надійної передачі енергії між регіонами та значних втрат 12–17%, в окремих областях до 30% електроенергії [55; 56].

Водночас, зміна показника операційної ефективності зумовлено чисельними ударами по вітчизняній енергетичній інфраструктурі, таким чином, важливим є дослідження безпекових факторів.

Кількість атак, фізичних руйнувань та диверсій є критичними для аналізу економічної безпеки у зонах ведення активних воєнних дій на території країни.

Наявність прямого виміру атак дозволяє розрізняти структурні проблеми від екзогенних шоків, що змінюють профіль ризику (рис. 2.5).

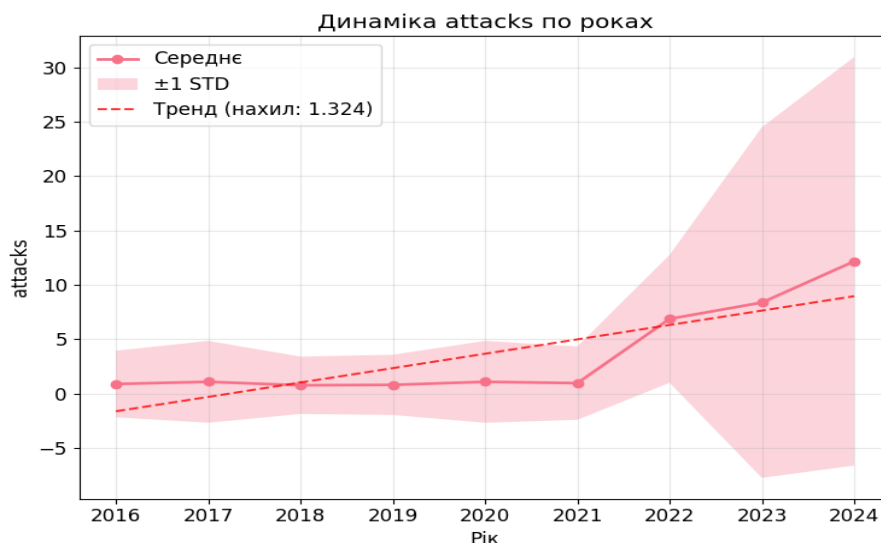


Рисунок 2.5 – Динаміка показника кількості атак на енергетичну інфраструктуру за роками

Джерело: сформовано автором на основі даних [48; 49; 50; 51; 52; 53]

Медіанне значення кількості атак на енергетичну інфраструктуру вказує на те, що для більшості спостережень у досліджуваному часовому та географічному проміжку фактор атак був відсутній, однак максимальне (77,00) та середнє (3,59) значення, а також найвища частка викидів (17,3%) підтверджують природу цього фактору як "події чорного лебедя" – рідкісної, але з високою силою впливу.

Лідерами за кількістю атак є Донецька, Луганська, Дніпропетровська та Запорізька області. Цей показник є чітким маркером військового впливу на стан енергетичного сектору та економічну безпеку регіонів, а також країни в цілому. Переважає значна висхідна тенденція, з нахилом, що дорівнює +1,32, і $p < 0,01$, що підтверджує її кореляцію з ескалацією збройного конфлікту з 2022 року (рис.2.6).

Атаки та технологічні аварії мають суттєвий вплив на людські ресурси, економічні втрати, обсяги введення інновацій і тривалість відновлення інфраструктури, саме тому цей фактор доцільно аналізувати у розрізі дослідження економічної безпеки енергетичного сектору.

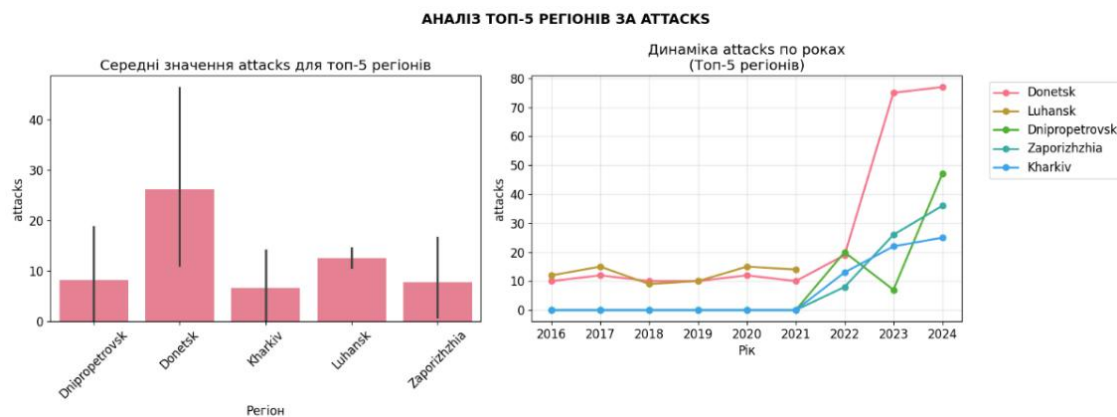


Рисунок 2.6 – Динаміка показника кількості атак на енергетичну інфраструктуру для топ-5 регіонів

Джерело: сформовано автором на основі даних [48; 49; 50; 51; 52; 53]

Аналітика ВРП показує стійку позитивну тенденцію зростання, майже лінійну і дуже значущу, що було очікувано, зважаючи на макроекономічний розвиток у конкретних регіонах та подальшу рецесію в країні (рис. 2.7).

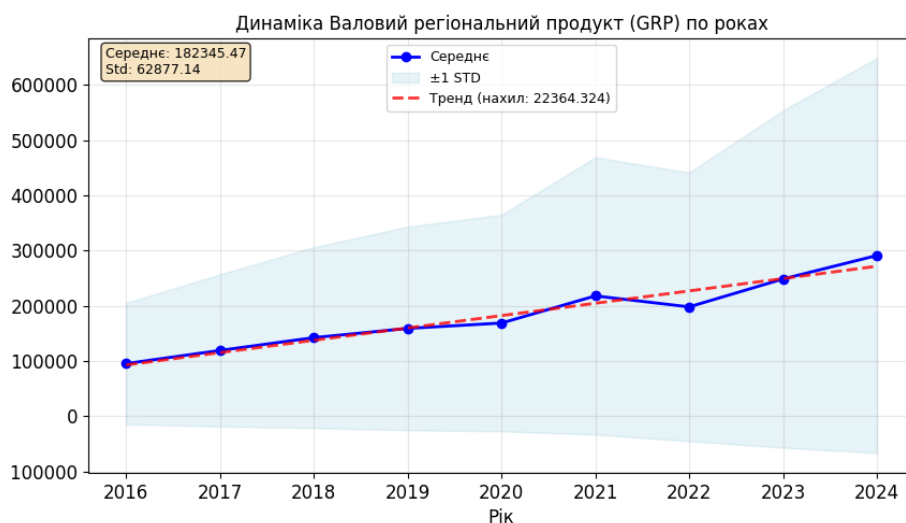


Рисунок 2.7 – Динаміка показника валового регіонального продукту за роками

Джерело: сформовано автором на основі даних [48; 49; 50; 51; 52; 53]

Розподіл змінної характеризується помірним розкидом значень(17,7%), що переважно пов'язано з ВРП м. Київ і великих індустріальних центрів.

Так, незалежною змінною, яку можна включити до моделей, є операційна ефективність шляхом порівняння запланованої та фактичної тривалості відключень. Це важливий показник ефективності оператора системи передачі електроенергії, однак тренд його зміни не є подібним до лінійного, внаслідок появи ризиків обстрілу енергетичної інфраструктури (рис. 2.8).

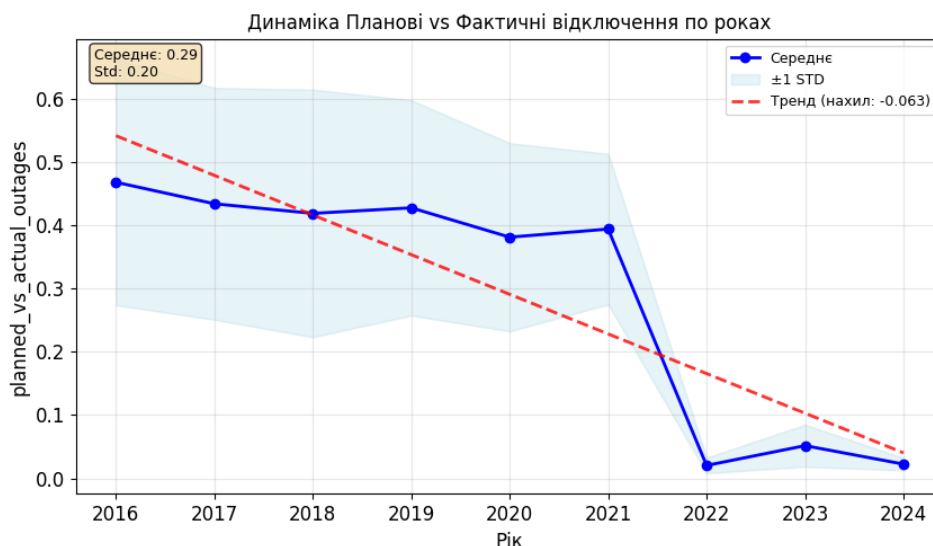


Рисунок 2.8 – Динаміка показника відношення тривалості планових відключень до фактичних за роками

Джерело: сформовано автором на основі даних [48; 49; 50; 51; 52; 53]

Значна розбіжність між запланованими та фактичними відключеннями може вказувати на непередбачені аварії, погану координацію роботи та недостатні ресурси для відновлення, що безпосередньо впливає на надійність постачання, і як наслідок загальну економічну безпеку галузі. Зважаючи на низьку дисперсію (0–0,75), відсутність викидів та стабільний розкид, цей показник є надійною детермінантою операційної дисципліни та ефективності управління мережею. Сильна негативна кореляція з показником SAIDI підтверджує, що домінування незапланованих (аварійних) відключень над плановими є прямим індикатором деградації системи, низької якості превентивного обслуговування та, як наслідок, високого SAIDI.

Усі змінні мають низьку частку пропусків (1,3–10,7%), що дозволяє застосовувати як методи заповнення пропущених даних, так і алгоритми, чутливі

до відсутніх значень. Найбільш проблемною є змінна `investment_region` (10,7% пропусків), імовірно через відсутність або нерегулярність публікацій даних у певні роки. Також основна частка пропущених значень припадає на Луганську область від початку повномасштабного вторгнення.

На етапі очищення ключовою процедурою є усунення пропущених значень, оскільки їх наявність потенційно спотворює оцінки регресійних моделей та ускладнює інтерпретацію просторових залежностей.

Якщо даних не було, стратегія полягає в тому, щоб заповнити прогалини середніми значеннями з відповідного регіону за весь період спостереження. Це дозволяє зберегти просторові відмінності та запобігти штучному вирівнюванню міжрегіональних диспропорцій. Для змінної «інновації» доцільно використовувати середнє річне значення для всього набору спостережень, оскільки це значення не змінюється протягом року і не показує жодних відмінностей всередині регіону. Якщо можливість обчислити середнє регіональне значення відсутня внаслідок відсутності даних, варто використати глобальне середнє значення для вибірки. Це методологічно прийнятний спосіб мінімізувати втрату інформації без введення систематичних зсувів у даних.

Аудит якості показує, що загальна база включає 225 спостережень і містить дев'ять змінних, які характеризують розвиток 25 регіонів України протягом 2016–2024 рр. Завдяки застосуванню обраної процедури імпутації всі пропуски повністю усунені, що забезпечує стабільність та повноту вибірки.

Особливої уваги потребують Луганська та Херсонська області, де середні значення `smart_meter` дорівнюють нулю. Це відображає об'єктивні обмеження щодо впровадження інноваційних проєктів, саме інтелектуальних лічильників у регіонах, які перебувають під інтенсивним військовим впливом та частковою окупацією, що узгоджується з наявними аналітичними оцінками стану енергетичної інфраструктури на деокупованих територіях.

Отже, на першому етапі обробки масиву необхідно зберегти його початковий розмір і переконатись, що в жодній з обраних для розгляду змінних немає пропусків. Це доводить, що етап підготовки виконується правильно і послідовно,

створюючи міцну основу для подальшого просторового економетричного моделювання та аналізу параметрів економічної безпеки енергетичного сектору регіонів України.

2.2 Кластерний аналіз енергетичного сектору регіонів України у розрізі взаємозв'язків стратегічних інновацій та економічної безпеки

Проведення діагностичної аналітики впровадження інновацій енергетичного сектору є важливим етапом для комплексного оцінювання стану економічної безпеки. Завдяки діагностичній аналітиці здійснюється аналіз закономірностей розвитку енергетичного сектору. Вчасна ідентифікація потенційних викликів дозволяє сформулювати обґрунтовані рішення для попередження негативного впливу макроекономічних чинників на кінцевий показник економічної безпеки, який формується у синергії технологічних, інвестиційних та інноваційних факторів.

У сучасному економічному середовищі інноваційна діяльність забезпечує формування резервів прибутку компаній галузі для підвищення їхньої фінансової безпеки і, як наслідок, економічної безпеки енергетичного сектору. Інноваційні проекти сьогодні розвиваються з високою маржинальною оцінкою.

Тільки у 2025 році було реалізовано понад 50 проектів у галузі енергетичної трансформації, що дозволило запровадити нові методи підвищення стійкості енергетичної системи.

Один із таких методів полягає у виконанні програми кредитування від Уряду та НБУ з червня 2024 року:

- для поліпшення фінансування,
- для будівництва відновлюваних джерел енергії,
- для придбання акумуляторів,
- для роботи підприємств у періоди відключення електричної енергії або закупівлі накопичувачів.

Відсоткові ставки кредитування для енергетичного сектору значено нижчі відносно інших галузей.

У 2025 році українські банки вже підписали договори на близько 20 млрд грн. Основними напрямками залишаються сонячні панелі, установки забезпечення енергії та газотурбінні установки для розширення розподіленої генерації у регіонах та формування їх як незалежної суб'єктної одиниці [48].

У жовтні 2023 року Фонд розвитку підприємництва надав послуги більш ніж тисячі підприємств малого та середнього бізнесу в межах фінансування Фондом енергетичного обладнання на суму 5 млрд грн [48].

Серед найбільш сучасних інвестицій, які плануються до запровадження вже найближчим часом, план від мережі супермаркетів Varus інвестувати щонайменше 150 мільйонів гривень у встановлення електростанцій, що працюють на сонячній енергії у своїх супермаркетах [53].

Власне, окупність таких 23 сонячних електростанцій у Дніпропетровській області, Одесі, а також у місті Києві та на Кіровоградщині дозволить зекономити близько 50 мільйонів гривень і згенерувати до 18% енергії від потреб обладнання супермаркету у літній період. Окупність проекту складає близько трьох років [53].

Інша мережа супермаркетів «Аврора» інвестувала у сонячні електростанції у Вінницькій та Полтавській області, що дозволило зекономити близько 12 млн грн за останні два роки, при загальній сумі інвестицій у розмірі 26 млн грн. Загальна потужність обох станцій становить близько 1,2 МВт у обох областях [53].

У літній період магазини «Аврора» можуть стовідсотково забезпечувати власні потреби. Водночас у зимовий період вони не мають надлишку, який могли б віддавати в загальну систему енергетики. Кінцевий термін завершення встановлення панелей на всіх магазинах компанії складає осінь 2025 року [53].

Та окрім приватних компаній, відновлювані джерела енергії впроваджують також комунальні підприємства і громади. Зокрема, міська рада Запоріжжя завдяки встановленню мережі сонячних електростанцій у закладах медичної та освітньої сфер міста, (сумарно 5 станцій), почали активно виробляти енергію починаючи з травня цього року. Це дозволило зекономити близько 650 тисяч гривень, а також скерувати їх на підтримку об'єктів критичної інфраструктури міста у період відключення електричної енергії внаслідок атаки ворога. Встановлення

електростанцій зменшило залежність об'єктів інфраструктури від централізованого електропостачання, а також дозволило перерозподілити зекономлені кошти на підтримку інших потреб міста і його громадян [48].

Серед важливих напрямів інноваційної діяльності у сфері підтримки економічної безпеки енергетичного сектору є розробка та виробництво біометану та біоетанолу приватним сектором. Зокрема, компанія «Вітагро» у Хмельницькій області розпочала виробляти близько 8 мільйонів кубічних метрів біометану на місяць. Щоб покрити вкладені кошти у розбудову заводів, згідно з планом, потрібно півтора року активної участі на ринку реалізації біометану, зокрема, продажу за ринковими цінами у Сполучене Королівство та Республіку Німеччина. Щодо заводу з біоетанолу, то обсяг інвестицій у його реконструкцію склав близько 20 мільйонів євро. Водночас, наразі цей завод фактично виробляє близько 25 тисяч тонн біоетанолу, експортуючи його у сусідні країни завдяки переробці близько 75 тисяч тонн кукурудзи [48].

Внаслідок критичної необхідності розвитку розподіленої генерації після обстрілів централізованої енергетичної інфраструктури, продовжили свою службу об'єкти з виробництва біометану та біоетанолу. Паралельно, підтримуючи виробництво електричної енергії за допомогою генераційних установок, «Нова пошта» в першу чергу запустила генераційну установку для підтримки сталої доступності до електричної енергії в одному із своїх центральних офісів. Кілька інших компаній також розвиваються у цьому напрямку [53].

Аналізуючи інші джерела електричної енергії, варто згадати про вітрову електроенергію, значна частина якої була зруйнована або взята в окупацію російськими військами. Водночас наразі за останній рік обсяги виробництва електричної енергії з вітрових електростанцій лише підвищуються. Загалом на 2025 рік очікується, що буде введено 833 МВт енергії, основним виробником та розповсюджувачем якої, завдяки грантам від держави, а також наявності інвесторів, є компанія «Вітрові парки України» [49].

Діагностика поточного рівня захищеності енергетичного сектору в умовах воєнного стану є критично важливою для розвитку економіки країни в цілому.

Аналітика впливу інновацій на економічну безпеку у поєднанні з іншими факторами формування економетричних моделей дозволяє спрогнозувати майбутній стан енергетичного сектору у регіональному розрізі. Одним із методів групування даних на основі кількісних величин, які характеризують стан факторів впливу на економічну безпеку, є кластерний аналіз.

Для дослідження використовувався комплексний методологічний підхід на основі кластерного аналізу з використанням алгоритму k-means для аналізу впливу стратегічних інновацій на економічну безпеку енергетичного сектору України. Для обґрунтування вибору показників та оцінки економічної безпеки вибрано такі фактори: показник тривалості відключень електроенергії; фактор інвестиційної активності (*investment_region*); параметр кількість атак, як показник зовнішніх загроз (*attacks*); параметр валового регіонального продукту, як значення економічного потенціалу. Перед кластеризацією дані були стандартизовані для усунення впливу різноманітності шкал вхідних змінних. Оптимальна кількість кластерів визначалася аналізом методу ліктя та коефіцієнта силуету та у межах отриманих результатів було обґрунтовано вибрано три класи. Використання стандартизації, з точки зору методології аналізу кластерної взаємодії, займає особливе значення у проведеному дослідженні, оскільки усуває проблему різних шкал змінних (рис. 2.9).

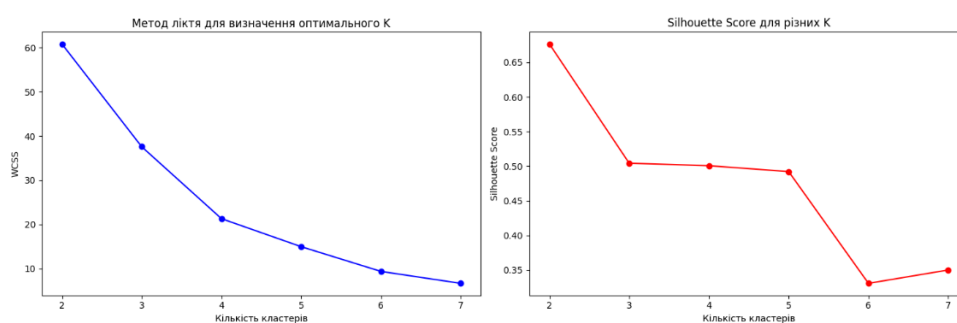


Рисунок 2.9 – Результати методів ліктя та силуету

Джерело: сформовано автором на основі даних [48; 49; 50; 51; 52; 53]

Емпіричні результати за методом К-середніх свідчать про чітку диференціацію регіонів України на три основні групи кластерів (рис. 2.10). Таким чином, кластер 0 об'єднав 19 регіонів, серед яких: Черкаська, Чернігівська,

Львівська, Полтавська, Хмельницька, Вінницька, Волинська, Закарпатська та інші. Цей кластер включає регіони із середнім рівнем економічної активності, помірним інвестиційним навантаженням і порівняно стабільним безпековим середовищем. Вони характеризуються збалансованими показниками безпеки та інвестиційного потенціалу, без різких відхилень. із загальним числом спостережень 171. Середнє значення тривалості відключень електричної енергії на одного споживача у регіоні становить 2 768,19 хв. На підставі одержаних даних можна зробити висновок про відносно високий рівень економічної стабільності у регіоні. Середня кількість атак із значенням 1,56 демонструє відносно некритичний рівень впливу військових дій. Стандартне відхилення знаходиться у межах від 1803,98 хв. до 3816,92 хв. Однак з одного боку дані вказують на істотний ріст тривалості відключень з моменту початку вторгнення водночас, а з іншого – відмінності всередині кластера є значними.

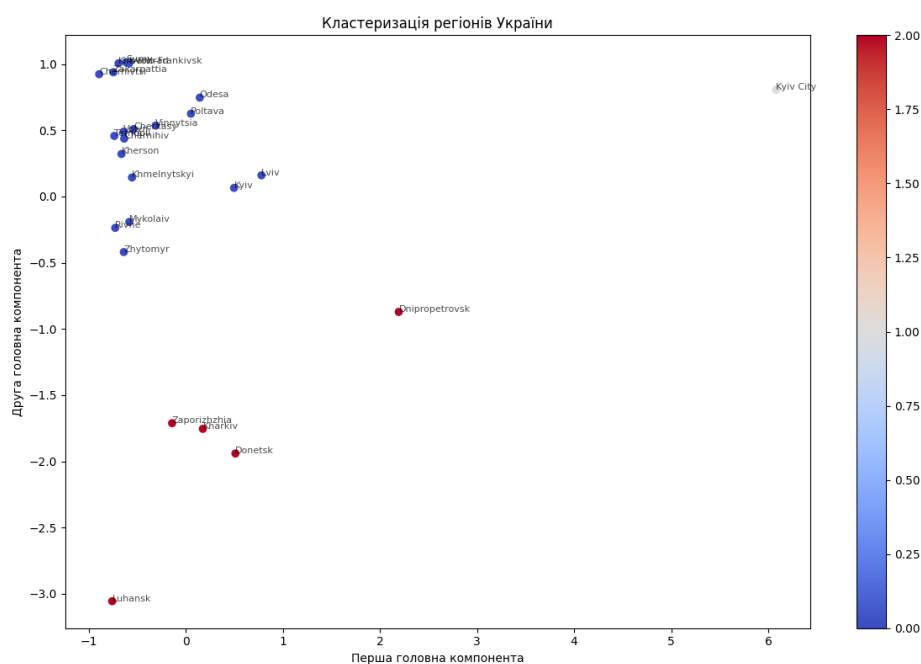


Рисунок 2.10 – Кластеризація регіонів України за рівнем безпеки

Джерело: розраховано та побудовано автором на основі даних [48; 49; 50; 51; 52; 53]

Найбільш високі значення показника SAIDI демонструють Сумська (3816,9 хв.), Івано-Франківська (3210,9 хв.) та Одеська (3296,5 хв.) області, тоді як

найнижчі – Житомирська (1803,9 хв.) і Рівненська (2021,0 хв.). Основною причиною такого розкиду є відмінності у рівні модернізації електромереж, частота аварій, щільності енергоспоживання та залежністю від міжрегіональних перетоків.

Для кластера 0 (рис. 2.11), обсяг впровадження розумних лічильників зростає і досі він становить понад 100 000 одиниць. Ці дані можна порівняти з показником інвестицій, динаміка якого формувалася до тривалої воєнної операції на території країни.



Рисунок 2.11 – Динаміка індикаторів інноваційної та інвестиційної діяльності кластера 0

Джерело: розраховано та побудовано автором на основі даних [48; 49; 50; 51; 52; 53]

Для кластера 0, піковим періодом обсягу інвестицій в енергосистему став останній передковідний рік, коли енергосистема активно розвивалась, формувався конкурентний ринок, а також виникла потреба в оновленні технічної бази компаній.

Кластер 1 включає тільки Київ, який виділяється як окремий центр високої економічної активності цифрової трансформації та інвестиційних потоків, хоча він поєднує високий індекс ризику через високу щільність інфраструктури та стратегічне значення з великим обсягом ВРП. Згідно отриманих даних столиця сильно вирізняється серед інших регіонів. Вона, фактично, є основним центром, де

здійснюються прийняття рішень щодо розвитку інших областей країни. Середня тривалість відключень у місті Київ – 2829,08 хв. Порівняно із стабільними регіонами кластера 0 це значення не є надто високим. У той же час спостерігається ключова різниця: стандартне відхилення відносно значне, 4752,73 хв. Можна зробити висновок, що ситуація у столиці є нестабільною – показник тривалості відключень від початку вторгнення лише зростає.

Середній рівень атак для міста Києва становить 1,89. Він дещо перевищує показник усереднений по країні в цілому, але ситуація не є критичною. Ураховуючи роль Києва як центру координації національних енергетичних потоків, коливання індексу безпеки мають високу системну значущість, адже вони потенційно можуть відображатися на стані всієї енергосистеми через її вузлове навантаження.



Рисунок 2.12 – Динаміка індикаторів інноваційної та інвестиційної діяльності кластера 1

Джерело: розраховано та побудовано автором на основі даних [48; 49; 50; 51; 52; 53]

Аналогічно до кластера 0, показник інвестицій в енергетичний сектор кластера 1 знижується від початку повномасштабного вторгнення, хоча досі залишається стабільно високим (рис. 2.12). Обсяги розумних лічильників лише зростають для цього кластера, вказуючи на проведення активної інноваційної

діяльності та формування сталого розвитку економічної безпеки енергетичного сектору навіть в умовах воєнної кризи.

Дніпропетровська, Донецька, Луганська, Харківська та Запорізька області входять до кластера 2. Атаки тут все ще дуже небезпечні та інтенсивні, промисловість сильна, але війна призводить до значного падіння інвестицій. Ця територія піддається значним військовими ризикам, при цьому залишаючись дуже важливим ядром промисловості для безпеки всієї країни. Стан економічного та соціального розвитку тут безпосередньо залежить від ситуації на фронті. У разі завдання будь-яких негативних впливів, в областях, що входять до цього кластеру може бути відзначено критичний рівень економічної безпеки енергетичного сектору.

Кластер характеризується середнім рейтингом SAIDI 1754,13 хв. при найвищому рівні атак 12,26, що відображає суттєвий вплив воєнних дій, фізичних руйнувань енергетичної інфраструктури та зростання ризиків системних відключень.

Особливо критичними є значення для Луганської області ($safety_index = 644,32$ хв.) та Харківської (1167,9 хв.). Слід зазначити, що значення для Луганської області є оціночними і можуть не повністю відповідати фактичним даним. На відміну від цього, Донецька область має високий середній індекс SAIDI (3442,6 хв.) при одночасно екстремально високому рівні атак (26,1), що вказує на значні пошкодження генеруючих потужностей та активність ведення бойових дій в останні роки.

Відповідно до даних щодо обсягу інновацій, у Кластері 2 спостерігається значна динаміка зростання інноваційної активності (рис. 2.13). Незважаючи на підвищений вплив воєнного фактору на деградацію енергетичної системи, показник впровадження розумних лічильників у мережу продовжує зростати завдяки проєктам підтримки цифровізації.



Рисунок 2.13 – Динаміка індикаторів інноваційної та інвестиційної діяльності кластера 2

Джерело: розраховано та побудовано автором на основі даних [48; 49; 50; 51; 52; 53]

Відповідно до даних щодо обсягу інвестицій, у Кластері 2 також спостерігається значна динаміка зростання фінансових вкладень в енергетичний сектор. Проте, обсяг інвестицій значно знизився до 2022 року, коли розпочалося повномасштабне вторгнення, та вже у наступних роках відновлюється для підвищення потужності енергетичного сектору. Інвестиції дозволяють підтримувати зростання показника кількості впроваджених розумних мереж для підтримки достатнього рівня економічної безпеки енергетичного сектору.

В цілому кластери демонструють високий ступінь внутрішньої однорідності та зовнішню диференційованість, що підтверджує релевантність обраних змінних для моделювання впливу стратегічних інновацій на регіональну економічну безпеку. Тому надалі важливим кроком є здійснення аналізу внутрішньокластерної кореляції, що дозволяє розширити взаєморозуміння зв'язків між показниками, які своєю чергою відображають різні аспекти функціонування енергетичного сектору.

Для кластера 0 показник Пірсона між значеннями тривалості відключень та показником атак на об'єкти енергетичної інфраструктури вказує на значний негативний вплив руйнувань на рівень економічної безпеки регіону. Із цього

впливає, що наразі для кластера 0 існує необхідність підвищення оперативного реагування на пошкодження мереж та необхідність оновлення підходів до управління енергетичним сектором в умовах постійних військових загроз (рис. 2.14).

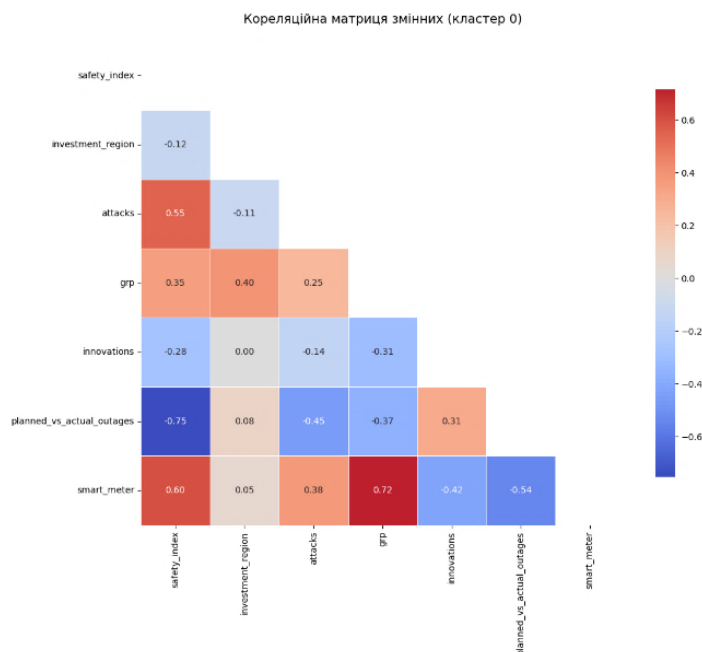


Рисунок 2.14 – Кореляційний аналіз регіонів України за відібраними факторами інноваційного впливу на економічну безпеку енергетичного сектору для кластера 0

Джерело: розраховано та побудовано автором на основі даних [48; 49; 50; 51; 52; 53]

Кореляція з ВРП, $r = 0,349$, свідчить, що економічно активніші регіони мають вищий SAIDI – ймовірно через вищу щільність споживання та зношення мереж. У той же час регіони, що встановлюють новітні системи обліку, стикаються із необхідними відключеннями електроенергії на період імплементації.

Найсильніший негативний зв'язок спостерігається між SAIDI та `planned_vs_actual_outages` ($r = -0,752$), що є показником ефективності планування: чим більша частка планових відключень відносно фактичних, тим меншою є тривалість непередбачених перерв. Отже, у кластері 0 найважливішими заходами для зниження SAIDI є планування ремонтів та технічного обслуговування, як і

підвищення інвестиційної та інноваційної активності для покращення рівня економічної захищеності енергетичного сектору.

Для кластера 1, місто Київ, існує сильна позитивна кореляція між SAIDI та кількістю атак ($r = 0,787$). Це показує, наскільки централізована інфраструктура чутлива до зовнішніх факторів. Існує також сильний зв'язок із валовим регіональним продуктом, $r = 0,779$, що можна пояснити тим, що споживання зосереджене в регіоні з високою індустріалізацією (рис. 2.15).

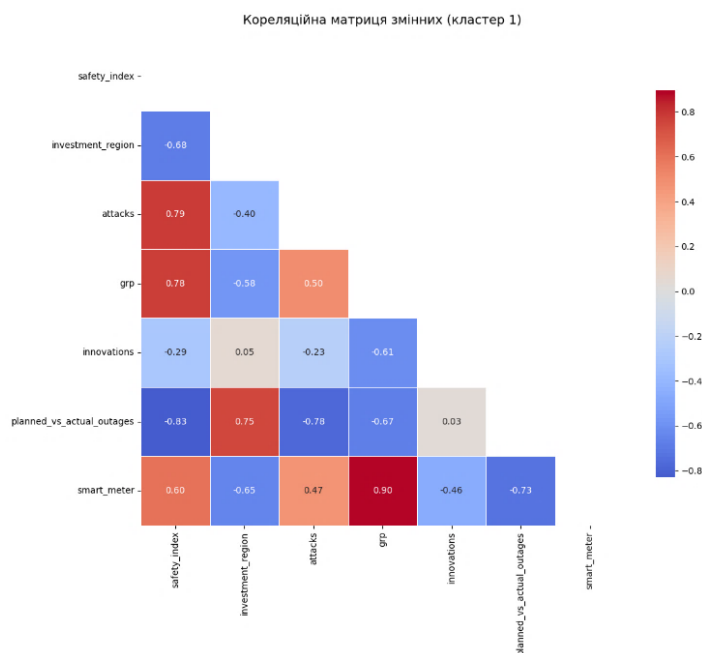


Рисунок 2.15 – Кореляційний аналіз регіонів України за відібраними факторами інноваційного впливу на економічну безпеку енергетичного сектору для кластера 1

Джерело: розраховано та побудовано автором на основі даних [48; 49; 50; 51; 52; 53]

Кореляція показника SAIDI з рівнем інвестицій, $r = -0,683$, є взаємно оберненою, таким чином більші інвестиції впливають на скорочення тривалості перерв у енергопостачанні. Це підтверджує ефективність цільових інвестиційних програм, спрямованих на модернізацію міських мереж, підстанцій та систем автоматизації обліку.

Значна негативна кореляція між показниками тривалості відключень на одну особу та відношенням планових до фактичних відключень, $r = -0,829$, підтверджує

тезу про те що факт якісної менеджерської роботи управління мережею є запорукою економічної безпеки енергетичного сектору міста. Тому, для кластера 1 ключовими драйверами зниження показника тривалості відключень електричної енергії є зростання інвестиційної активності, стимулювання розвитку енергетичних мереж і якісне планування відновлюваних робіт. У той же час, зовнішні атаки ворога на інфраструктуру залишаються основним ризиком впливу на стабільність постачання енергії до домогосподарств та промислових одиниць.

Для кластера 2 спостерігається висока позитивна кореляція між тривалістю відключень та кількістю атак на інфраструктуру, $r = 0,749$. Це вказує на значний негативний вплив воєнних і техногенних факторів на тривалість перерв електропостачання (рис. 2.16).

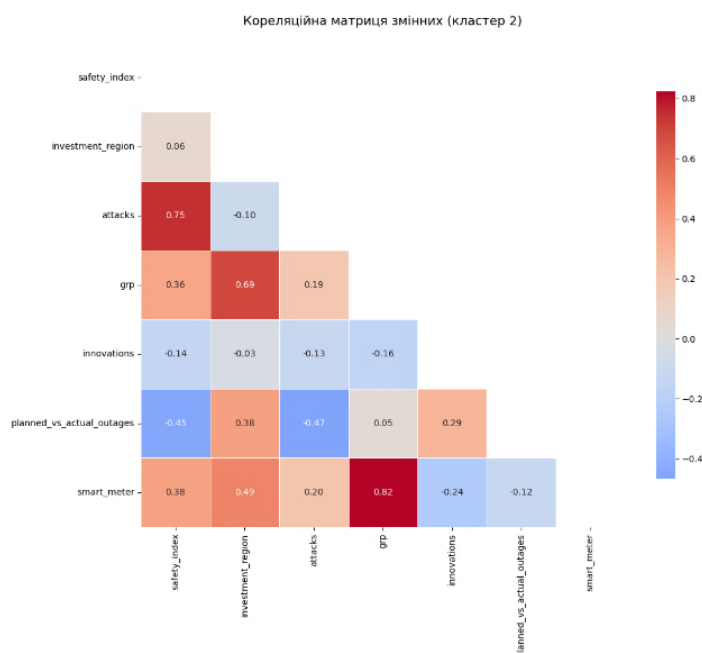


Рисунок 2.16 – Кореляційний аналіз регіонів України за відібраними факторами інноваційного впливу на економічну безпеку енергетичного сектору для кластера 2

Джерело: розраховано та побудовано автором на основі даних [48; 49; 50; 51; 52; 53]

Високі значення SAIDI у цьому регіоні здебільшого пов'язані не з управлінськими недоліками, а з фізичним руйнуванням інфраструктури. Помірна позитивна кореляція з smart_meter, $r = 0,380$, свідчить, що навіть у складних умовах

триває впровадження інноваційних цифрових технологій, проте їх вплив на покращення показників поки що обмежений. Зв'язок із ВРП, $r = 0,358$, вказує на те, що більш розвинені промислові області водночас є зонами найбільшої уразливості внаслідок зростання активності атак ворога на виробничі потужності із високою доданою вартістю.

Відносно слабка негативна кореляція з інноваціями та середня з плановими відключеннями свідчать про низьку ефективність управлінських інструментів у кризових умовах. Таким чином можна зробити висновок, що навіть за наявності дієвих інноваційних рішень для підвищення економічної безпеки енергетичного сектору, їх вплив нівелюється постійними пошкодженнями мереж і недостатньо високим навантаженням системи відносно заявленого попиту.

Отже, кореляційний аналіз підтверджує просторову асиметрію детермінант надійності електропостачання: для стабільних регіонів вирішальними є організаційні та інноваційні фактори, тоді як для східних – безпекові.

Для проведення оцінювання взаємозв'язків у просторовому розрізі між визначеними кластерами використовується модель міжкластерних перетоків із подальшим формуванням матриці W . Така матриця дає змогу змоделювати інтенсивність взаємодії кластерів між собою. Застосування моделі міжкластерних потоків передбачає врахування генерації та споживання як просторових еквівалентів міжрегіональних взаємодій і залежностей між територіями. Відповідно, що менша відстань між регіонами, то більшим є кількісний обсяг перетоків між ними.

Енергетичний баланс показує, що Кластер 0 та Кластер 2 мають надлишкову генерацію, теоретично покращуючи їхню надійність, тоді як Кластер 1 має дефіцит; він очікувано сприятиме погіршенню економічної безпеки енергетичного сектору.

Ці потенційні міжкластерні перетоки перетворені на показники взаємозалежності, які використовуються як ключовий регресор для оцінки SAIDI. Якщо кластер є експортером енергії, це вказує на потенційну більшу надійність економічної забезпеченості енергетичного сектору регіону. У такому разі енергетична система регіону є стабільнішою та може надавати доступ до своїх

потужностей сусіднім кластерам. У той же час, якщо кластер є імпортером енергії, це вказує на залежність, що означає вищий SAIDI.

Матриця перетоків між кластерами трансформується в матрицю вагових компонент:

$$W_c = \begin{bmatrix} 1 & 0,038 & 0 \\ 0 & 0,062 & 0 \\ 0 & 0,383 & 0,701 \end{bmatrix}.$$

Матриця перетоків електричної енергії має вигляд матриці розмірністю 3×3 , оскільки в роботі використано саме три кластери. Надалі ця матриця збільшує свою розмірність відповідно до кількості областей України для побудови взаємодії та інтенсивності перетоків енергії між кластерами, до яких належать ці регіони. І загалом отриману матрицю в подальшому буде нормалізовано для використання у моделі (рис. 2.17).

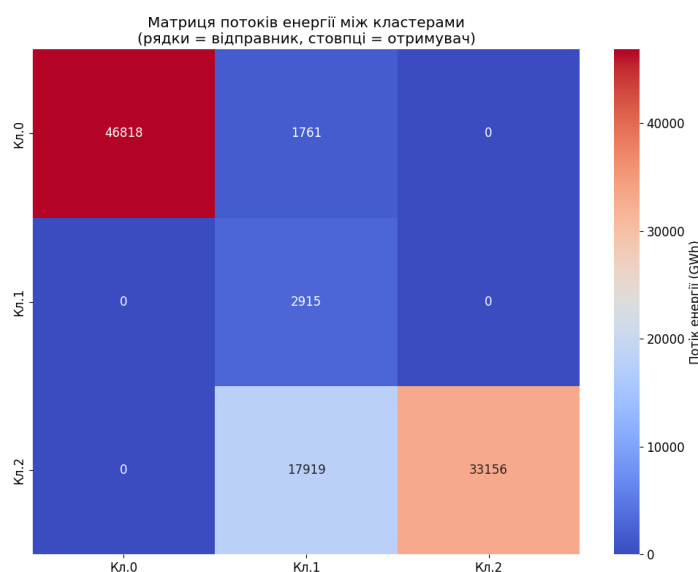


Рисунок 2.17 – Матриця потенційних перетоків електроенергії між кластерами

Джерело: розраховано та побудовано автором на основі даних [53]

Для врахування територіальної взаємозалежності, яка є критичною в енергетичних дослідженнях, впроваджується аналітичний інструментарій просторової економетрики. Наступним кроком розраховується просторовий лаг SAIDI для всіх 25 регіонів, що відображає середній показник надійності сусідніх регіонів, впливаючи на надійність досліджуваного регіону. Таким чином, щоб

здійснити перевірку на наявність автокореляції у просторовому розрізі, використовується метод Морана, також відомий як індекс Морана. Цей статистичний метод дозволяє здійснити обчислення значущості просторової автокореляції. Для України вона є достатньо низькою, тобто взаємозв'язки між регіонами щодо передачі електричної енергії складно визначити, взаємозалежність невелика: $-0,0404$ при вкрай високому p -значенні $= 0,9950$. Це можна пояснити також тим, що основною причиною відсутності електропостачання є не зменшення генерації, а руйнування електричних підстанцій. Це свідчить про те, що SAIDI в одній області статистично не залежить від SAIDI в сусідніх областях, що може бути нетиповим для незруйнованої мережі, але логічним в умовах значної кількості атак на магістральні лінії електропередачі та трансформаторні підстанції.

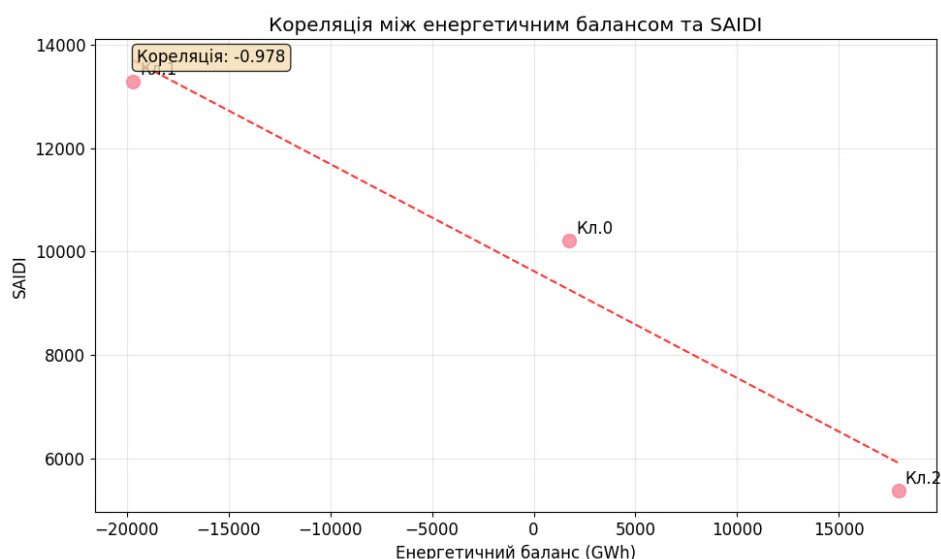


Рисунок 2.18 – Кореляція енергетичного балансу та показника безпеки енергетичного сектору

Джерело: розраховано та побудовано автором на основі даних [53]

Фактичний аналіз впливу енергетичного балансу на SAIDI проводився окремо для кожного кластера. У всіх трьох випадках – Кластер 0 ($p=0,062$), Кластер 2 ($p=0,074$) та Кластер 1 – вплив перетоків енергії виявився статистично незначущим при стандартному рівні значущості $\alpha=0,05$ (рис. 2.18). Отримані результати вказують на неможливість використання лінійної регресії для пояснення міжрегіональної взаємодії. Однак, згідно з даними взаємозв'язок між

регіонами потенційно може бути включений до моделі за умови наявності спеціалізованих даних міжрегіональних перетоків енергії у вільному доступі для визначення прогностного стану економічної безпеки енергетичних секторів регіонів.

2.3. Аналіз регіональних економетричних моделей економічної безпеки енергетичного сектору України

Здійснення аналітики економічної безпеки не в останню чергу залежить від реалізації побудови якісної економетричної моделі на основі проведеного кластерного аналізу. Розроблені моделі дозволяють детально спрогнозувати майбутній стан енергетичного сектору з точки зору його економічної безпеки.

Таким чином, побудовано три основні кластери:

Кластер 0 (перша група): включає області із достатньо високим рівнем економічної безпеки енергетичного сектору, але водночас значною складністю щодо залучення сучасних інвестицій.

Кластер 1 (місто Київ): для нього спостерігається складна енергетична ситуація. Водночас він є достатньо відкритим для інновацій та інвестиційної активності як економічний центр розвитку країни.

Кластер 2 (східні регіони): у цьому кластері зібрано східні регіони, які найбільше піддаються впливу негативних безпекових факторів. Для них економічна безпека енергетичного сектору знаходиться у дуже складному становищі, зокрема через активні бойові дії та низькі обсяги вкладання коштів у розвиток енергетичної системи, що, своєю чергою, послаблює економічну безпеку, стримує здійснення інноваційної активності і може спричинити довготривалу кризу енергетичного сектору у майбутньому.

Завдяки можливостям програмного апарату та економетричним моделям побудовано регресійну модель, що дозволить оцінити вплив детермінант, які формують значення економічної безпеки і впливають на тривалість вимкнень електричної енергії у регіональному розрізі.

Однією із найбільш поширених моделей панельного аналізу, що інтегрує методику традиційних економетричних методів і методів просторової статистики, є модель Лагранжа, або просторової економетрики, перевірена через критерій Лагранжа. Тому для кожного із кластерів регіонів побудовано окрему регресійну модель, яка враховує різницю рівнів розвитку та питомих вагових коефіцієнтів впливу незалежних показників на цільову змінну. Це здійснюється, спираючись на поточні відмінності між кластерами, що було описано у попередньому підрозділі. Загалом, для прийняття рішення щодо адекватності та якості моделей, використано ітеративну процедуру діагностики (рис. 2.19).

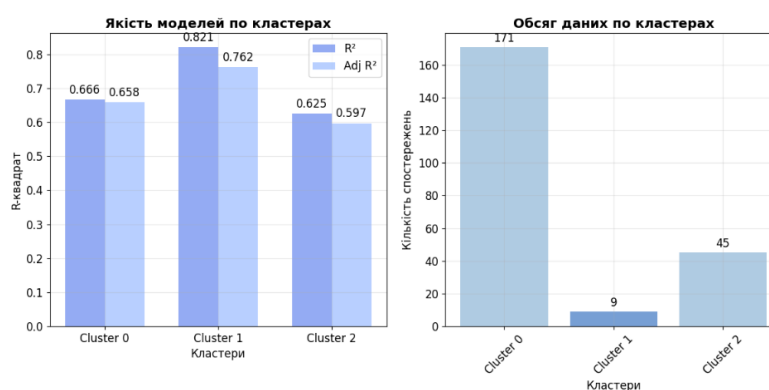


Рисунок 2.19 – Структура кластерів до моделювання

Джерело: розраховано та побудовано автором на основі даних [48; 49; 50; 51; 52; 53]

Спочатку автоматично виключаються з моделі змінні з високим ступенем кореляції, єдиною такою змінною є ВРП. Надалі для кожного із кластерів відбираються значимі регресори згідно критеріїв VIF та якості моделей R^2 для кожного кластеру. Це дозволяє мінімізувати потенційний вплив мультиколінеарності на економічну безпеку енергетичного сектору на основі аналізу стратегічних інновацій. Тобто моделі мають кращу пояснювальну здатність без використання взаємозамінних незалежних змінних. Такі мультикорельовані змінні потенційно спотворюють результати.

У процесі побудови моделей виникає проблема гетероскедастичності для кластера 0. З метою її корегування застосовується метод робастних стандартних помилок HC3. Таким чином отримується інформація щодо статистичної

значущості коефіцієнтів у фінальній регресійній моделі для кластеру, що покращує економічну безпеку енергетичного сектору на основі аналізу стратегічних інновацій. На жаль, використання інтегрального просторового лагу не залучається до фінальної моделі. Основною причиною невикористання `spatial_lag_safety` є недостатня значущість для прогнозування значення залежної змінної. Таким чином внутрішньокластерна взаємодія має більш сильний вплив на значення показника тривалості відключень, аніж міжрегіональна просторова взаємозалежність.

В результаті моделювання отримуються достатньо високі показники коефіцієнтів детермінації, визначається, що скоригований R^2 коливається в межах від 0,6580 до 0,7618.

Для кластеру, що об'єднує більшість областей України, модель отримує достатньо високий показник детермінації – 0,658. Основними пояснювальними змінними у моделі виявляються співвідношення різних типів відключень електроенергії, фактична кількість атак на енергетичні об'єкти, рівень інвестиційних вкладень у регіони та обсяги встановлених на території областей розумних лічильників, як детермінанти інноваційного розвитку. Згідно з отриманими коефіцієнтами впливу, найбільш значущим є співвідношення планових до фактичних відключень. Це вказує на необхідність швидкого реагування енергетиків на непередбачувані пошкодження інфраструктури, що покращує економічну безпеку енергетичного сектору на основі аналізу стратегічних інновацій.

Вплив воєнного фактору простежується за другим за величиною фактичного впливу показником на значення тривалості відключень. Так можна визначити значущість впливу зовнішніх загроз на кінцеві можливості споживання електроенергії. Достатнім є ефект інвестицій та розумних лічильників. Позитивний ефект `smart-meter` на кінцеве значення відключень електроенергії пояснюється недостатньо поширеним на території кластеру встановленням розумних лічильників. Вони мають обмежений вплив на загальне постачання і вимагають відключень енергії на час їхнього встановлення (рис. 2.20), що потребує

подальшого аналізу економічної безпеки енергетичного сектору на основі аналізу стратегічних інновацій.

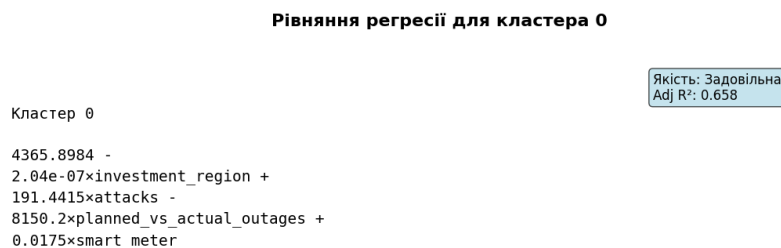


Рисунок 2.20 – Рівняння множинної регресії для кластера 0

Джерело: розраховано та побудовано автором на основі даних [48; 49; 50; 51; 52; 53]

Діагностична перевірка на автокореляцію за допомогою коефіцієнта Дарбіна-Уотсона показує 1,7055, що в межах норми, проте водночас засвідчує наявність гетероскедастичності за тестом Бройша-Пагана, скориговану за допомогою робастних стандартних помилок НСЗ. Попри неідеальну нормальність залишків, результати залишаються економічно інтерпретованими та статистично значущими (рис. 2.21).

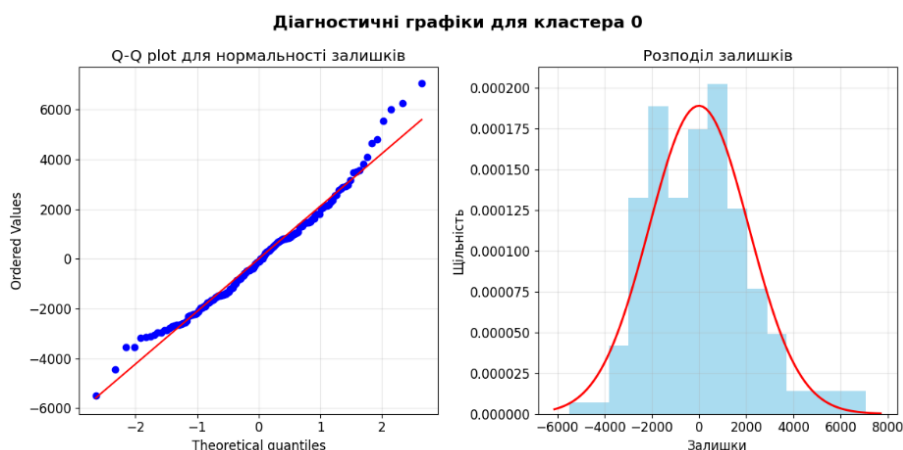


Рисунок 2.21 – Діагностичні графіки для кластера 0

Джерело: розраховано та побудовано автором на основі даних [48; 49; 50; 51; 52; 53]

Модель для кластера 0 має задовільну якість, що підтверджується F-статистикою, яка свідчить про статистичну значущість моделі в цілому. Аналіз

мультиколінеарності (VIF) для всіх змінних показує значення менше 2, що свідчить про відсутність високої мультиколінеарності серед змінних.

Для міста Києва, що є єдиним регіоном для кластера 1, спостерігається модель детермінації, де пояснювальна здатність є найвищою ($R^2 = 0,762$). Збільшення атак +747,66 має найбільш значний негативний вплив на надійність постачання електроенергії порівняно з іншими кластерами, що підкреслює критичну вразливість даного кластера до обстрілів інфраструктури, які значно негативно впливають на поточний стан економічної безпеки енергетичного сектору. При цьому зростання інвестицій ($-3,172 \times 10^{-7}$) статистично значуще покращує надійність енергопостачання (рис. 2.22).

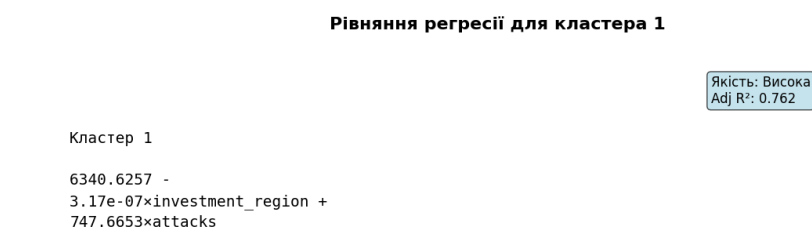


Рисунок 2.22 – Рівняння множинної регресії для кластера 1

Джерело: розраховано та побудовано автором на основі даних [48; 49; 50; 51; 52; 53]

Загалом, модель для кластера 1 не відображає значних порушень нормальності чи автокореляції залишків, а отже, її результати можна вважати стабільними та достовірними. F-статистика (13,7959, $p = 0,0057$) також підтверджує статистичну значущість моделі (рис. 2.23).

Тест Jarque-Bera вказує на нормальний розподіл залишків ($p = 0,6717$), тест Дарбіна-Уотсона показує відсутність автокореляції в залишках, а тест Бройша-Пагана підтверджує гомоскедастичність ($p = 0,2838$), що свідчить про сталість дисперсії залишків.

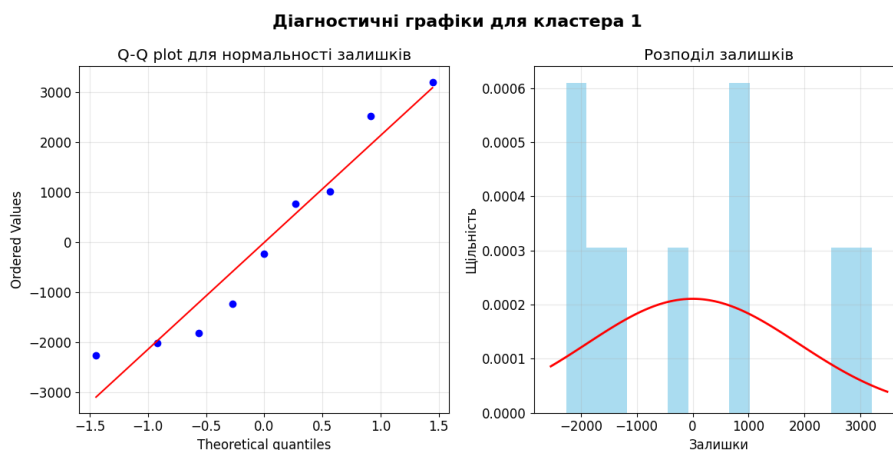


Рисунок 2.23 – Діагностичні графіки для кластера 1

Джерело: розраховано та побудовано автором на основі даних [48; 49; 50; 51; 52; 53]

Для останнього кластера, який охоплює всі східні регіони, показник детермінації щодо побудованої регресійної моделі є достатньо високим і перевищує 0,6. Основними впливовими факторами є показник кількості атак ворога на енергетичну інфраструктуру в областях, частка планових відносно фактичних відключень електричної енергії, а також інвестиції у регіони. Загалом, найбільший негативний вплив на фактичне значення кінцевого недоспоживання електричної енергії чинить саме кількість атак на енергетичну інфраструктуру. Вона погіршує надійність фактору відключень. А частка планових відносно реальних відключень вказує на те, що загалом кінцеве значення показника SAIDI може значно варіюватись.

Однак спостерігається парадоксально незначний вплив інвестицій у регіон на кінцеве значення відключень, хоча вони мають прямий лінійний зв'язок. Це може бути спричинено тим, що інвестиції спрямовуються переважно в ті регіони кластера, які вже мають гірші початкові показники надійності внаслідок постійних обстрілів (рис. 2.24).

Рівняння регресії для кластера 2

Кластер 2

$$652.6506 + 2.67e-07 \times \text{investment_region} + 108.5961 \times \text{attacks} - 3224.7 \times \text{planned_vs_actual_outages}$$

Якість: Задовільна
Adj R²: 0.597

Рисунок 2.24 – Рівняння множинної регресії для кластера 2

Джерело: розраховано та побудовано автором на основі даних [48; 49; 50; 51; 52; 53]

Відсутність гетероскедастичності та автокореляції підтверджує внутрішню узгодженість моделі (рис. 2.25).

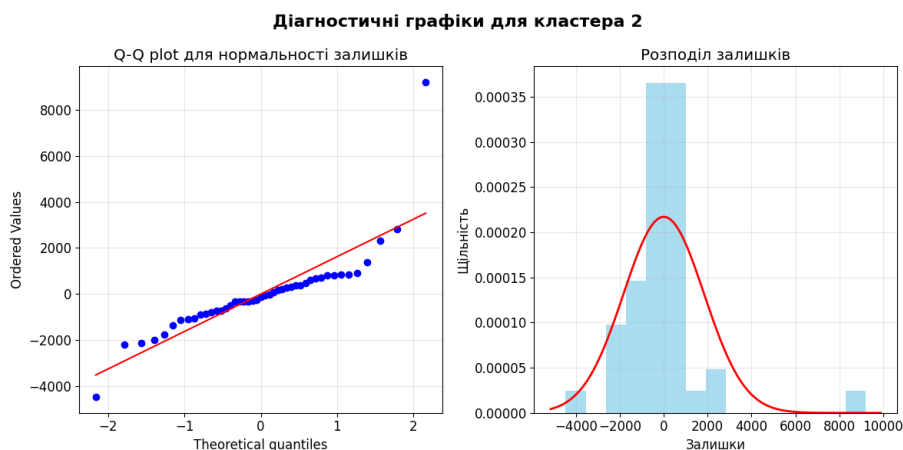


Рисунок 2.25 – Діагностичні графіки для кластера 2

Джерело: розраховано та побудовано автором на основі даних [48; 49; 50; 51; 52; 53]

Тест Дарбіна-Уотсона вказує на відсутність автокореляції в залишках $DW = 1,7874$, а тест Бройша-Пагана вказує на гомоскедастичність $p = 0,2103$.

Надалі для здійснення прогнозування показника економічної безпеки та визначення потенційного значення економічної безпеки для енергетичного сектору здійснюється прогнозування ключових незалежних змінних (регресорів), які визначаються як значущі детермінанти показника надійності енергопостачання SAIDI на регіональному рівні. Для прогнозування використовується простий, але

робастний метод: порівняльний трендовий аналіз на основі лінійної регресії по часу, застосований для кожного регіону окремо.

Модель добре підходить для прогнозування змінних, які мають стабільний, довгостроковий напрямок зміни. Доцільність використання цього методу пояснюється додатковою складністю побудови більш громіздких моделей через обмеженість панельних даних, які мають недостатньо значну кількість часових спостережень. Це сприяє економічній безпеці енергетичного сектору на основі аналізу стратегічних інновацій.

Якість кожної трендової моделі оцінюється на історичних даних за показниками середньої абсолютної процентної помилки MAPE та коефіцієнтом детермінації R^2 (рис. 2.26).

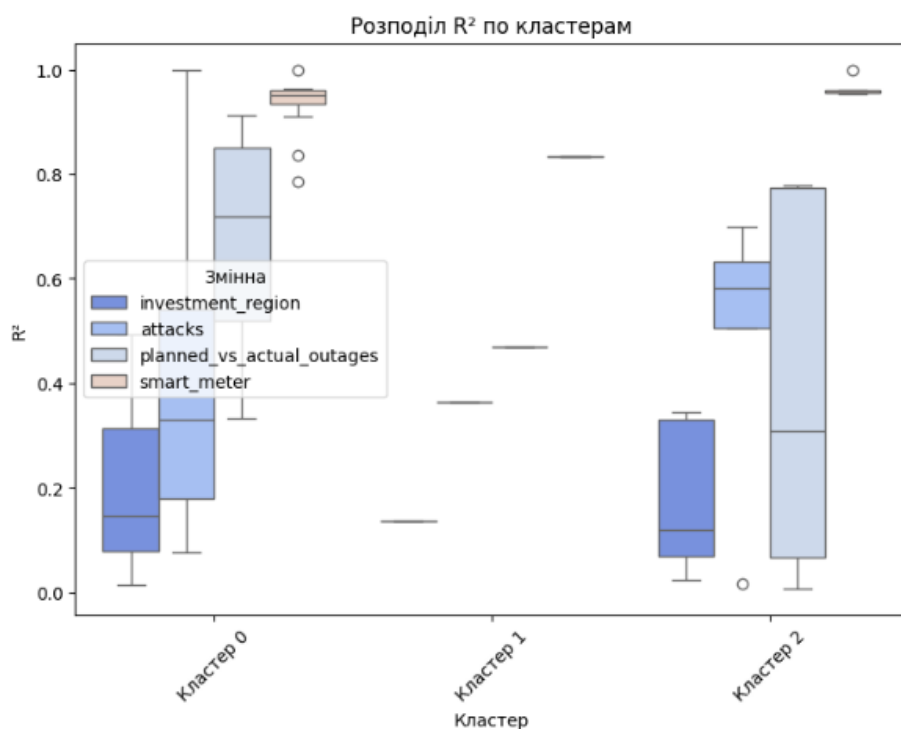


Рисунок 2.26 – Якість прогнозів за кластерами

Джерело: розраховано та побудовано автором на основі даних [48; 49; 50; 51; 52; 53]

Для кластера 0, який об'єднує переважну частину регіонів країни, результати моделювання свідчать про значну варіативність показників (табл. 2.2).

Таблиця 2.2 – Усереднені моделі прогнозування незалежних чинників для кластера 0

Незалежний показник	Модель
investment_region	$\text{investment_region} = -18555105.02 \times \text{year} + 38735760973.35$
attacks	$\text{attacks} = 0.71 \times \text{year} - 1424.85$
planned_vs_actual_outages	$\text{planned_vs_actual_outages} = -0.07 \times \text{year} + 135.17$
smart_meter	$\text{smart_meter} = 14733.17 \times \text{year} - 29713409.66$

Джерело: розраховано та побудовано автором на основі даних [48; 49; 50; 51; 52; 53]

Модель інвестицій у регіон показала низьке значення $R^2 = 0,19$ при досить високій похибці ($\text{MAPE} \approx 191,3\%$), що вказує на відсутність вираженої закономірності у часовій динаміці інвестиційних потоків та на наявність зовнішніх шоків факторів, які не піддаються лінійному моделюванню.

Для змінної attacks коефіцієнт детермінації становив $R^2 = 0,37$, а $\text{MAPE} = 53,1\%$, що свідчить про помірну тенденцію до зростання кількості атак, однак із великою розсіюваністю даних.

Показник planned_vs_actual_outages характеризується вищим рівнем узгодженості ($R^2 = 0,68$), що вказує на поступове скорочення розриву між плановими і фактичними відключеннями, внаслідок удосконалення механізмів планування.

Водночас, найвищим рівнем детермінації відзначається показник smart_meter $R^2 = 0,94$, показуючи стабільне зростання частки регіонів, оснащених інтелектуальними приладами обліку спожитої електричної енергії. Таким чином спостерігається значимість впровадження інноваційних технологічних рішень у даному кластері.

Отже, кластер 0 характеризується низькою передбачуваністю фінансових показників і високою стабільністю інноваційного чинника, що говорить про плавну адаптацію регіонів до цифровізації мережі.

Подібними до кластера 0 є особливості моделей для Києва. Середній рівень узгодженості даних для investment_region є достатньо невеликим, як і помірною

відносна похибка прогнозу ($\text{MAPE}=25\%$), що свідчить про нерівномірність, але не хаотичність динаміки інвестиційних потоків (табл. 2.3).

Таблиця 2.3 – Усереднені моделі прогнозування незалежних чинників для кластера 1

Незалежний показник	Моделі
investment_region	$\text{investment_region} = -1023391681.52 \times \text{year} + 2082771926061.17$
attacks	$\text{attacks} = 0.77 \times \text{year} - 1546.78$
planned_vs_actual_outages	$\text{planned_vs_actual_outages} = -0.04 \times \text{year} + 73.24$
smart_meter	$\text{smart_meter} = 40311.48 \times \text{year} - 81299051.47$

Джерело: розраховано та побудовано автором на основі даних [48; 49; 50; 51; 52; 53]

.Змінна attacks має $R^2 = 0,36$, $\text{MAPE} = 58,7\%$, що відображає тенденцію до зростання частоти атак, проте з великими коливаннями у часі.

Для показника planned_vs_actual_outages значення фактору детермінації становить 0,47, але тренд, на відміну від решти, не є стабільним. Спостерігається певний дисбаланс відхилень похибок у залишках від нормального розподілу. Модель для показника smart_meter для м. Києва має достатньо якісні характеристики прогнозу, зокрема коефіцієнт детермінації є дуже високим $R^2=0,83$. Таким чином, перш за все, перший кластер демонструє високу інноваційну активність та цифровізацію енергетики, що виправдовує вкладені у розвиток фінансові ресурси.

Моделювання дозволяє здійснити висновок про підвищену чутливість факторів до зовнішнього впливу у кластері, до якого входять східні промислові регіони – кластер 2 (табл. 2.4).

Обсяг інвестицій у регіоні є не лінійним. Показник фактичної детермінації вказує на низьку пояснювальну здатність моделі: $R^2 = 0,18$, $\text{MAPE} = 31,5\%$. Це зумовлено значною нестабільністю економічного середовища внаслідок впливу воєнного фактору. Таким чином, кошти, які могли б спрямовуватися на розвиток енергетичної інфраструктури, перерозподіляються на оптимізацію витрат, пов'язаних із забезпеченням обороноздатності країни.

Таблиця 2.4 – Усереднені моделі прогнозування незалежних чинників для кластера 2

Незалежний показник	Модель
investment_region	$\text{investment_region} = 52314220.71 \times \text{year} - 103081583660.64$
attacks	$\text{attacks} = 3.87 \times \text{year} - 7795.04$
planned_vs_actual_outages	$\text{planned_vs_actual_outages} = -0.04 \times \text{year} + 86.74$
smart_meter	$\text{smart_meter} = 23957.67 \times \text{year} - 48302646.47$

Джерело: розраховано та побудовано автором на основі даних [48; 49; 50; 51; 52; 53]

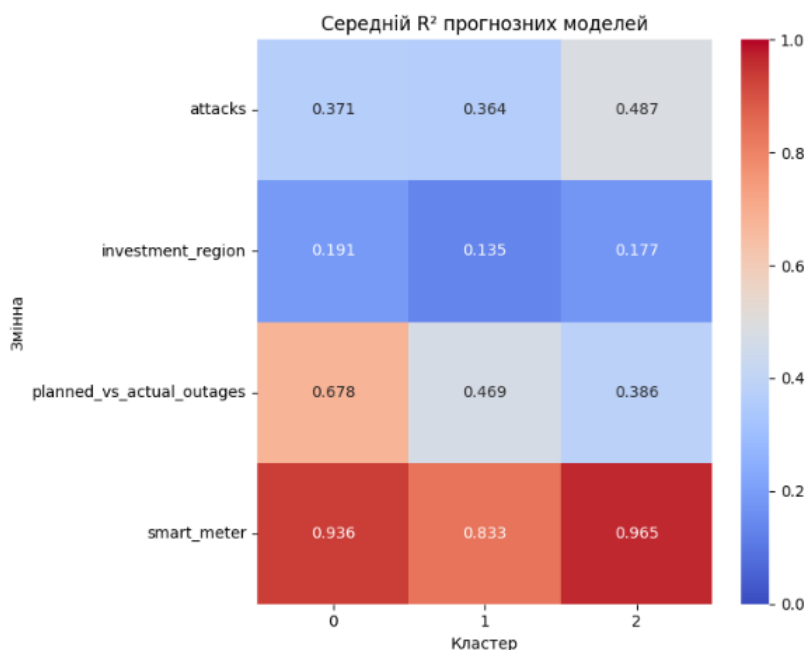
Що стосується атак, їх кількість різко зросла. Це вже стало тенденцією: ситуація з частотою атак погіршується, особливо на сході. Саме цей напрям зараз виглядає ключовим для подальших досліджень: $R^2 = 0,49$, $\text{MAPE} = 52,5\%$. Під час прогнозування коефіцієнт детермінації є недостатньо високим, адже прогнозувати потенційні атаки на інфраструктуру надзвичайно складно.

Щодо змінної співвідношення планових та фактичних відключень, також спостерігається зростаючий тренд. Висока нестабільність за показником MAPE : $R^2 = 0,39$, $\text{MAPE} = 212,5\%$, вказує на потребу в оперативнішому управлінні електропостачанням та підвищенні гнучкості відповідних процесів.

Показник розумних лічильників демонструє значну варіативність, водночас для нього спостерігається найбільш стабільний і зростаючий рівень детермінації: $R^2 = 0,97$, $\text{MAPE} = 57,3\%$. Це засвідчує, що впровадження інтелектуальних технологій можливе навіть у регіонах, які зазнають найбільшого впливу воєнних дій.

Отже, східний кластер характеризується поєднанням інвестиційної нестабільності та високої інноваційної адаптивності, що відображає прагнення до відновлення енергетичної інфраструктури через технологічні рішення.

Отже, моделі для прогнозування показника smart_meter демонструють найвищу пояснювальну здатність серед усіх чинників у досліджуваних кластерах (рис.



2.27).

Рисунок 2.27 – Якість прогнозів за незалежними змінними

Джерело: розраховано та побудовано автором на основі даних [48; 49; 50; 51; 52; 53]

Понад 83% розкиду щодо впровадження розумних лічильників може пояснитися саме лінійним трендом згідно зі зміною часової детермінанти. Таким чином, впровадження інноваційних технологій є часто лінійним сталим процесом, який навіть в умовах війни недостатньо сильно коливається відносно інших параметрів, що зміцнює економічну безпеку енергетичного сектору як основна стратегічна інновація.

Позитивний коефіцієнт при змінній year підтверджує стійке зростання кількості встановлених лічильників. Моделі для співвідношення планових та фактичних відключень мають посередній рівень пояснювальної здатності, як і моделі для прогнозування безпекового чинника, тобто кількості атак на енергетичну інфраструктуру.

Значення обсягу вкладених інвестицій у регіон складно прогнозувати у зв'язку з погіршенням економічної ситуації в державі на фоні повномасштабного

вторгнення. Отже, інвестиційна діяльність у кластерах знижується під час кризових періодів. Згідно з отриманими моделями, у період стратегічної зміни пріоритетів важливо фокусуватися не лише на галузі, у яку терміново потрібно спрямовувати кошти, але й на інноваційні напрямки діяльності, які дозволяють підтримувати економічну безпеку всієї країни.

Висновки до другого розділу

У підсумку виконання другого розділу здійснено діагностичну аналітику стратегічних інновацій у концепції формування економічної безпеки енергетичного сектору. Визначено модель, яка агрегує основні детермінанти формування економічної безпеки з точки зору технологічної надійності, доступності, стійкості до зовнішніх потрясінь та підтримки інвестиційно-інноваційного розвитку галузі.

Використовуючи комплекс факторів впливу на економічну безпеку, сформовано масив розмірністю 25 регіонів для аналізу інноваційного, інфраструктурного, географічного, економічного та соціального потенціалу кожної з областей країни за період з 2016 по 2024 роки. Основним індикатором впливу інновацій на економічну безпеку обраний показник SAIDI, який найбільше коливається за регіонами починаючи з 2022 року. Його зміна зумовлена варіацією обсягу інвестицій у регіони в останні роки, коливанням кількості інновацій у загальному тренді та погіршенням безпекової ситуації в країні.

Водночас визначено, що кількість смарт-лічильників, як одного з найбільших репрезентативних показників стратегічних інновацій, що впливають на безпеку енергетичного сектору, лише зростає за останні роки. Як і валовий регіональний продукт у номінальному вираженні.

З метою комплексного аналізу даних здійснено аналітику стратегічних інновацій на економічну безпеку та досліджено сучасні інноваційні заходи щодо покращення поточного стану енергетичного сектору у межах підвищення флуктуацій на ринку.

Таким чином, основні інноваційні ініціативи здійснюються завдяки доступним програмам фінансування Урядом, а також підтримці іноземних партнерів та українських бізнесів. Стратегічними пріоритетами є розбудова сонячної та вітрової генерації, встановлення систем накопичення енергії та «розумного» обліку, а також розвиток біоенергетики.

За регіонами для визначення структурних подібностей між даними використано алгоритм кластерного аналізу. Оцінено, що дані у своїй подібності можуть об'єднатися за трьома кластерами. Кластер 0 включає інформацію щодо регіонів із високим рівнем вкладання коштів у інноваційний розвиток розумних лічильників.

Кластер 1 сформовано на основі даних міста Києва як відокремленої територіальної одиниці, що відрізняється від інших регіонів України завдяки значним обсягам впровадження розумних лічильників.

Останнім кластером, який було сформовано завдяки використанню методу К-середніх, став Кластер 2, для якого аналогічним є тренд до збільшення кількості впроваджених розумних лічильників. Водночас, фінансування іншої інноваційної діяльності у регіоні є відносно низьким у зв'язку з безпековою ситуацією в регіоні.

У підсумку найбільша взаємодія між показниками тривалості відключень спостерігається у значенні кількості атак на енергетичну інфраструктуру, значенні впроваджених розумних лічильників, інвестицій та пропорції загальних відключень енергії до планових.

Завдяки формуванню матриці міжрегіональної взаємодії визначено регіони, які можуть співпрацювати для підтримки енергетичного балансу країни. Водночас, внаслідок пошкодження ліній електропередачі, впровадження аналітики міжрегіональних перетоків енергії є ускладненим, що підтверджує індекс Морана.

У підсумку побудовано моделі економічної безпеки, які є достатньо якісними з точки зору їхньої пояснювальної здатності для проведення аналітики стратегічних інновацій у підвищенні економічної безпеки енергетичного сектору.

3. РЕКОМЕНДАЦІЙНА СТРАТЕГІЧНА АНАЛІТИКА ІННОВАЦІЙ У ПІДВИЩЕННІ ЕКОНОМІЧНОЇ БЕЗПЕКИ ЕНЕРГЕТИЧНОГО СЕКТОРУ УКРАЇНИ

3.1 Розроблення аналітичного інструментарію оцінювання стратегічних інновацій для забезпечення економічної безпеки енергетичного сектору

В умовах сучасної складної безпекової ситуації, спричиненої військовою агресією проти України, постає питання необхідності обґрунтування наукового підходу для оцінювання впливу стратегічних інновацій на підвищення економічної безпеки енергетичного сектору як на національному, так і на регіональному рівнях. Воєнні загрози, технологічне відставання та нерівномірність інноваційного розвитку посилюють вразливість вітчизняної системи енергетичного сектору. В умовах, коли стратегічні інновації є ключовим інструментом забезпечення стійкості енергетики, з'являється необхідність у розробці якісного аналітичного інструментарію оцінювання впливу стратегічних інновацій на забезпечення збалансованого розвитку енергетичного сектору країни.

У зв'язку з цим ключовим кроком є визначення детермінант розвитку енергетичного сектору, а також потенційних викликів у розрізі регіональної взаємодії зі створенням прогностичної моделі економічної безпеки.

У підсумку запропонована методика дозволить оцінити перспективи розвитку стратегічних інновацій для формування обґрунтованих управлінських рішень щодо підвищення економічної безпеки енергетичного сектору.

На першому етапі роботи здійснено ідентифікацію ключових стратегічних інновацій, які забезпечують підвищення економічної безпеки енергетичного сектору в умовах воєнних загроз і структурних трансформацій. Серед основних інновацій виокремлено розвиток відновлюваної енергетики, цифровізацію систем обліку та моніторингу енергоспоживання, запровадження технології розумних мереж та інтелектуальних систем керування, підвищення можливостей для впровадження систем накопичення енергії шляхом інвестицій в енергомережу.

На другому етапі визначалися ключові чинники, які можуть впливати на рівень економічної безпеки. Зокрема, кількість атак на енергетичну інфраструктуру, фінансова стабільність регіону, успішність керування енергосистемою як відношення планових до фактичних відключень енергії, інвестиційний потенціал та значення втрат валового регіонального продукту. Загалом, на даному етапі використовувалася інформаційно-дослідницька база даних для формування сукупності інформації з метою подальшої її обробки з точки зору оцінки стану економічної безпеки енергетичної системи.

Наступним етапом здійснюється оцінювання впливу інновацій на мінімізацію економічних втрат з точки зору інтегрального індексу економічної безпеки, що дозволяє проаналізувати залежність вартості години простою до енергоємності регіональної економіки. Таким чином можливим є розрахунок ефекту від впровадження стратегічних інновацій у вигляді зниження можливостей для потенційних збитків. Ця цифра виходить із валового регіонального продукту та коефіцієнта еластичності, який показує, наскільки економічна діяльність регіону залежить від електропостачання під впливом впровадження стратегічних інновацій. Формула для розрахунку даного показника має наступний вигляд:

$$LossHour = \alpha \times \frac{GRP}{8760}, \quad (3.1)$$

де $LossHour$ – вартість однієї години простою виробництва або надання послуг внаслідок відсутності електроенергії,

α – частка економічної активності, що безпосередньо залежить від електропостачання,

GRP – валовий регіональний продукт, який вимірюється в грн для кожної досліджуваної області.

Нещодавні дослідження методик оцінки втрат від відключень відображають різну динаміку коефіцієнта еластичності α для різних країн і секторів економіки – від кількох відсотків у недостатньо енергомістких економіках третіх країн світу до десятків відсотків річного продукту за умов масштабних відключень електроенергії [57].

Українська економіка є порівняно енергомісткою, із високою енергоємністю ВРП і значною часткою промислового виробництва, отже частка економіки, яка безпосередньо залежить від безперебійного електропостачання, відповідно є досить високою. За останні десятиліття енергетична інтенсивність України помітно перевищує сусідів і більшість країн, з якими вона знаходиться в одному діапазоні за рівнем ВВП на душу населення. Таким чином вибір частки економічної активності потрапляє в межі від 0,1 до 0,3, отже, доцільно взяти 0,2 за усередненим сценарієм.

З метою типологізації регіонів за подібними ознаками щодо інноваційного розвитку використано метод К-середніх із попереднім застосуванням зменшення розмірності для уникнення мультиколінеарності і виділення основних факторів впливу на розвиток енергетичної системи. Це дозволило забезпечити чітку інтерпретованість результатів, мінімізувати вплив факторів, які могли б знизити оцінювальну здатність методу щодо порівняльної аналітики регіонів за рівнем інноваційного розвитку та стандартизувати регіони відповідно для можливості формування об'єднаної бази даних. Таким чином регіони було згруповано за рівнем готовності до інноваційної модернізації та впливу військових шоків.

Після цього формується імітаційне моделювання розвитку економічної безпеки з метою оцінювання сценаріїв та потенційних змін розвитку підвищення економічної безпеки енергетичного сектору України. Застосовується сценарний аналіз на основі трьох основних траєкторій розвитку. Зокрема:

- консервативний / песимістичний з низькими інвестиціями у відновлювані джерела та зниженням обсягів інновацій у секторі,
- базовий / реалістичний з трендом, подібним до поточного стану економічної безпеки сектору,
- стратегічний / оптимістичний, який включає збільшення інновацій та підвищення інвестиційної активності в енергетичному секторі.

Розраховуються також розподіли інтегрального індексу за кожним сценарієм і відповідно аналізується та порівнюється ймовірність настання кожної з можливих траєкторій розвитку енергетичного сектору.

Наступний крок аналізу економічної безпеки енергетичного сектору полягає у побудові прогнозних значень для показника SAIDI у межах різних типів впливу зовнішніх факторів впливу. Таким чином доцільно провести розрахунок очікуваних економічних втрат, що формується шляхом добутку показника SAIDI на вартість простою однієї години:

$$ExpectedLoss = SAIDI \cdot LossHour, \quad (3.2)$$

де *ExpectedLoss* – очікувані економічні втрати внаслідок простоїв виробництва чи надання послуг.

У підсумку, інтегральний показник економічної безпеки дозволяє визначити, наскільки впроваджені інновації, а також основні макроекономічні показники, що паралельно впливають на економічну безпеку, дозволяють розвиватись енергетичному сектору з урахуванням ймовірного покращення можливостей для ефективного функціонування галузі. Він розраховується як нормалізація показника економічних втрат відносно об'єму регіонального продукту:

$$IES = 1 - \frac{ExpectedLoss}{GRP}. \quad (3.3)$$

Отримане значення $IES \in [0; 1]$ визначає ступінь захищеності регіональної економіки від можливих загроз, які виникають внаслідок недостатньої стабільності енергозабезпечення. Значення близьке до одиниці свідчить про покращення економічної безпеки енергетичного сектору.

Запропонований аналітичний інструментарій має низку важливих методичних переваг порівняно з традиційними підходами до оцінювання економічної безпеки енергетичного сектору.

По-перше, розроблена модель дозволяє здійснювати оцінювання не лише у статичному вимірі, а й у динаміці майбутнього розвитку. Завдяки інтеграції імітаційного моделювання, сценарного підходу та методів прогнозної аналітики забезпечується можливість урахування впливу невизначеності на ключові показники та інноваційні параметри. Це дає змогу оцінити вплив стратегічних інновацій на рівень економічної безпеки в середньостроковій та довгостроковій

перспективі, що є критично важливим в умовах високої турбулентності енергетичного ринку.

По-друге, запропонована методика враховує просторову асиметрію розвитку енергетичної інфраструктури та регіональних особливостей, що часто ігнорується у наявних дослідженнях. Застосування кластерного аналізу у поєднанні з методами зниження розмірності дозволяє виокремити групи регіонів з подібними характеристиками стійкості та інноваційного потенціалу. Це забезпечує формування диференційованих управлінських рішень і сприяє більш точному визначенню пріоритетів державної політики, спрямованої на збалансований енергетичний розвиток країни.

По-третє, важливою перевагою є інтеграція інноваційно-технологічних чинників з оцінкою економічних наслідків. Інструментарій синхронізує три ключові компоненти — рівень впровадження стратегічних інновацій, інтенсивність факторів впливу та масштаб потенційних економічних втрат. Це дозволяє не лише визначити наявний стан сектору економіки, а й кількісно оцінити економічний ефект від модернізації енергетичної системи, зокрема зниження вартості невідпущеної електроенергії, втрат ВВП та доступ до фінансування інноваційних проєктів у галузі.

У підсумку, завдяки запропонованому аналітичному інструментарію, можливим стає прозорий, зрозумілий та економічно обґрунтований аналіз чутливості впливу стратегічних інновацій на забезпечення економічної безпеки енергетичного сектору у регіональному розрізі. У майбутньому це забезпечить підвищення якості управлінських рішень, побудованих на аналітичних рекомендаціях, що сформовані завдяки даному дослідженню у період воєнного та післявоєнного відновлення.

Отже, поточний етап являє собою оцінювання впливу інновацій на мінімізацію економічних втрат з точки зору формування інтегрального індексу економічної безпеки. Для початку здійснюється розрахунок обсягу вартості однієї години простою внаслідок відсутності електропостачання. Найвища вартість простою фіксується у регіонах кластера 0, зокрема у Львівській, Київській,

Одеській та Полтавській областях (рис. 3.1). Така концентрація високих втрат пояснюється поєднанням кількох структурно-економічних факторів.

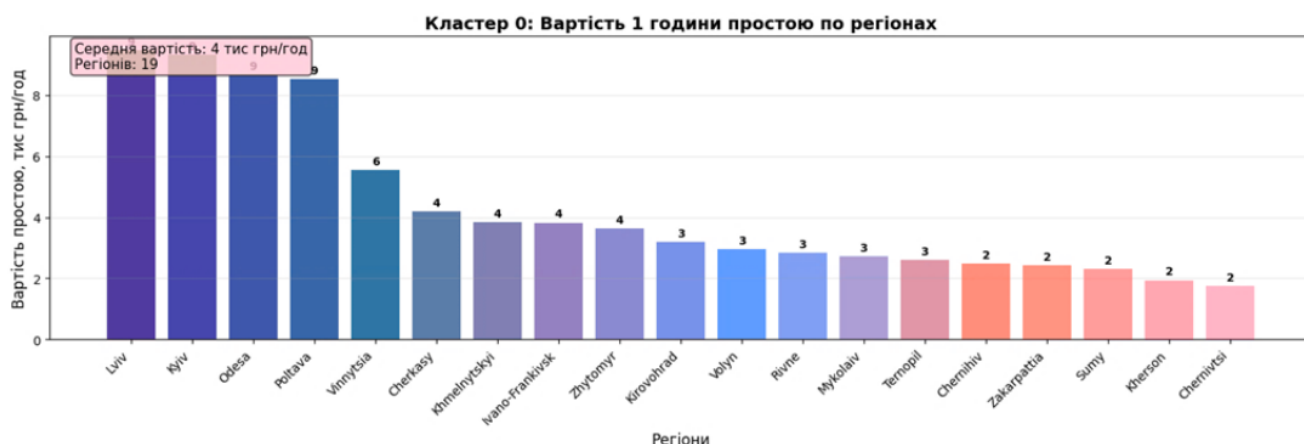


Рисунок 3.1 – Вартість простою виробництва та надання послуг у разі відсутності електроенергії для кластера 0

Джерело: розраховано та побудовано автором на основі даних [48; 49; 50; 51; 52; 53]

По-перше, ці регіони характеризуються високим рівнем урбанізації та демографічного приросту, що зумовлює зростання енергоспоживання у промисловому, транспортному та побутовому секторах.

По-друге, тут сконцентровано значну частку високотехнологічних і безперервних виробництв, діяльність яких критично залежить від стабільного електропостачання. Зокрема, у Київській та Львівській областях розміщено потужні ІТ-хаби, у Полтавській – нафтогазовидобувна та переробна промисловість, а в Одеській – логістично-портова інфраструктура. Це обумовлює те, що кожна година зупинки виробництва чи надання послуг призводить до значних економічних втрат – близько 10 тис.грн/год, що є найбільшим показником серед усіх регіонів країни.

По-третє, рівень втрат від години простою відображається не лише у структурі економіки регіону, але в масштабі введення стратегічних інновацій у виробництві та енергетиці. Зокрема, впровадження інтелектуальних рішень та розумних мереж у Львівській та Київській областях покращує адаптивність

енергетичної інфраструктури до аварійних ситуацій для зниження непродуктивних втрат бізнесу.

Внаслідок зростання кількості енергетичних інновацій, впроваджених у регіоні, рівень економічної безпеки та вартості простою виробництва знаходиться на рівні норми. Адже інновації дозволяють компенсувати вартість простою завдяки можливості використання систем аварійного резерву та розподіленої генерації у період відсутності напруги в об'єднаній енергосистемі України.

Натомість для решти областей, таких як Вінницька, Черкаська, Хмельницька, Івано-Франківська, Житомирська, Кіровоградська, Волинська, Рівненська, Миколаївська, Тернопільська, Чернігівська, Закарпатська, Сумська, Херсонська та Чернівецька, вартість простою суттєво нижча – у межах 2–6 тис. грн/год. Це зумовлено меншою концентрацією енергомістких виробництв і переважанням аграрного, харчового та малотехнологічного секторів, діяльність яких має відносно гнучкіші технологічні цикли і нижчу енергетичну залежність. Крім того, у цих регіонах валовий регіональний продукт на душу населення є меншим, що зменшує грошову оцінку втрат у розрахунку на одну годину простою.

Таким чином, спостережуване зниження вартості простою від 10 тис. грн/год у лідируючих регіонах до 2 тис. грн/год у менш економічно активних областях відображає структурну асиметрію національної економіки. Вона полягає у концентрації капіталомістких і технологічно складних виробництв, а також можливостях реалізації інноваційних енергетичних рішень у великих агломераціях, тоді як периферійні регіони залишаються більш орієнтованими на енергетично менш чутливі види діяльності. Це, своєю чергою, зумовлює просторову диференціацію рівня економічної безпеки, адже вплив перебоїв в електропостачанні в економічно активних центрах має значно більші макроекономічні наслідки.

Середня вартість простою для міста Києва, що становить близько 41 тисячі гривень за годину, пояснюється низкою структурно-економічних та інноваційно-технологічних чинників, які суттєво відрізняють столицю від інших регіонів України (рис. 3.2).

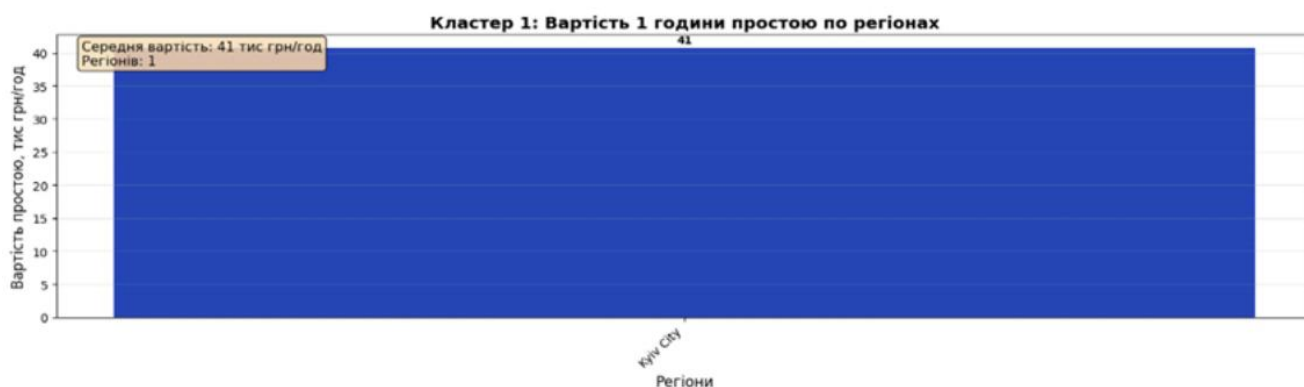


Рисунок 3.2 – Вартість простою виробництва та надання послуг у разі відсутності електроенергії для кластера 1

Джерело: розраховано та побудовано автором на основі даних [48; 49; 50; 51; 52; 53]

По-перше, висока концентрація підприємств з великою доданою вартістю – фінансових, ІТ-компаній, офісів міжнародних корпорацій, логістичних та сервісних центрів – зумовлює значні втрати навіть за короткочасних зупинок у роботі. Вартість простою тут розраховується не лише через безпосередню втрату виробничого продукту, а й через замороження інвестиційних проєктів, знищення продуктів інноваційної діяльності та порушення логістичних ланцюгів.

Ще однією причиною, чому для Києва вартість простою виробництва така висока, є його адміністративна відповідальність відносно інших міст. У Києві існує значна необхідність підтримки фінансової інфраструктури, тому перебої в електропостачанні суттєво впливають не лише на роботу підприємств або публічних установ, але також і на бізнеси, роботу банківських систем та державних установ.

Відповідно, великого значення набувають саме короткочасні перебої, які можуть суттєво сповільнити розвиток промислового центру. Саме тому висока середня вартість простою в Києві у поєднанні з високою економічною активністю порівняно із сусідніми регіонами вказує на значну чутливість міста до відключень. Тому кожна година зупинки може спричинити значні втрати для малого,

середнього та великого бізнесу, а також унеможливити надання послуг чи виробництво товарів для кінцевого споживача.

Різниця у вартості простою виробництва у кластері 2 – промислових регіонів України полягає у значних структурних, інноваційних, виробничих та безпекових чинниках (рис. 3.3).

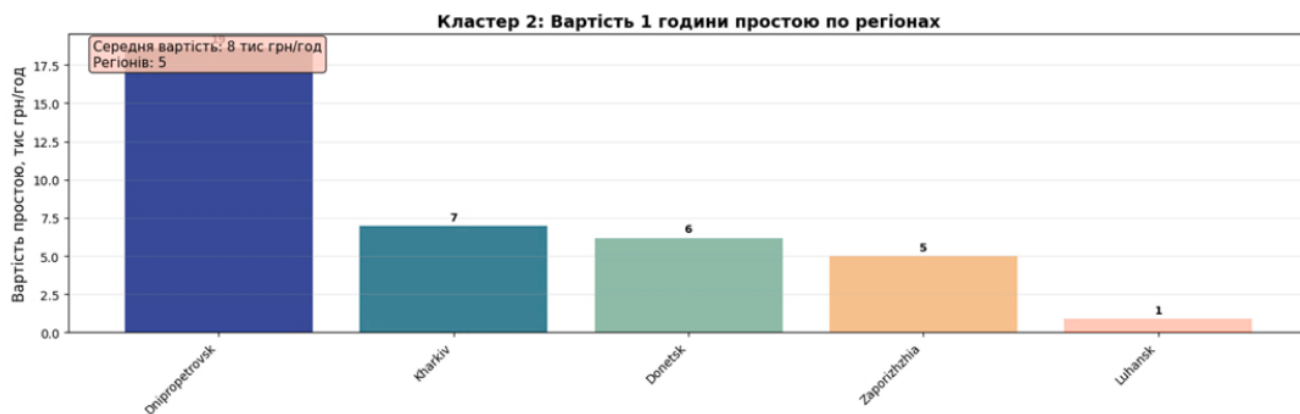


Рисунок 3.3 – Вартість простою виробництва та надання послуг у разі відсутності електроенергії для кластера 2

Джерело: розраховано та побудовано автором на основі даних [48; 49; 50; 51; 52; 53]

Для Дніпропетровської області, де середня вартість простою становить близько 18 тисяч гривень за годину, висока величина вартості пояснюється тим, що регіон залишається ключовим індустріальним центром країни з потужною металургійною, гірничо-збагачувальною, машинобудівною та енергетичною базою. На території областей другого кластеру зосереджено велику кількість підприємств важкої металургії та високотехнологічних виробництв, які включають значну частку витрат на функціонування, зокрема електричної енергії. До того ж ці підприємства виготовляють продукцію для всього регіону, а тому потребують достатнього обсягу вхідних первинних ресурсів для виробництва кінцевих товарів.

Для Харківської області вартість простою становила приблизно 7000 грн за годину. До війни Харків залишався одним із найбільших науково-технічних центрів країни. Нині, внаслідок руйнування інфраструктури та відтоку висококваліфікованих кадрів, частина підприємств припинила діяльність, проте

збереглися високотехнологічні виробництва. Деякі з них досі забезпечують необхідні товари та послуги для населення України, що пояснює достатньо високе значення вартості години простою в Харкові.

Щодо Донецької області, то відповідний показник знижується та становить приблизно 6000 грн/год. Від 2014 року область частково перебувала в окупації, а нині фактично повністю знаходиться під контролем ворога. Багато підприємств припинили свою діяльність, значна частина населення виїхала в більш стабільні регіони, що суттєво вплинуло на загальну вартість простою.

У Запорізькій області значення залишається на середньому рівні. Там функціонують великі промислові підприємства, однак доступ до них ускладнений через постійні атаки, зменшення інвестиційних потоків та, зокрема, неможливість доступу до Запорізької АЕС.

Найнижче значення має Луганська область, оскільки доступу до неї фактично немає: більшість підприємств зруйновано, а вплив на економічну базу регіону скоротився майже до нуля. Наведені дані орієнтовано на довоєнні показники з урахуванням нинішнього стану від початку повномасштабного вторгнення, тому інтегральний показник є достатньо низьким.

Отже, вартість простою між кластерами суттєво різниться, що зумовлено диференційованим економічним підґрунтям кожної області. І чим ближче область розташована до зони бойових дій, тим вищий показник тривалості відключень та нижче значення вартості години простою, що обумовлено фактичним руйнуванням інфраструктури та неможливістю впровадження інноваційних проєктів як важливого чинника розвитку та підвищення економічної безпеки регіону.

Наступний крок аналізу економічної безпеки енергетичного сектору полягає у аналізі кореляції показника тривалості відключень та економічних втрат за регіонами на основі доступних даних (рис. 3.4).

Загалом спостерігається позитивна помірна кореляція: зі збільшенням тривалості відключень зростають і економічні втрати, однак не лінійно – темп зростання суттєво залежить від структури економіки та рівня інвестиційної активності регіону.

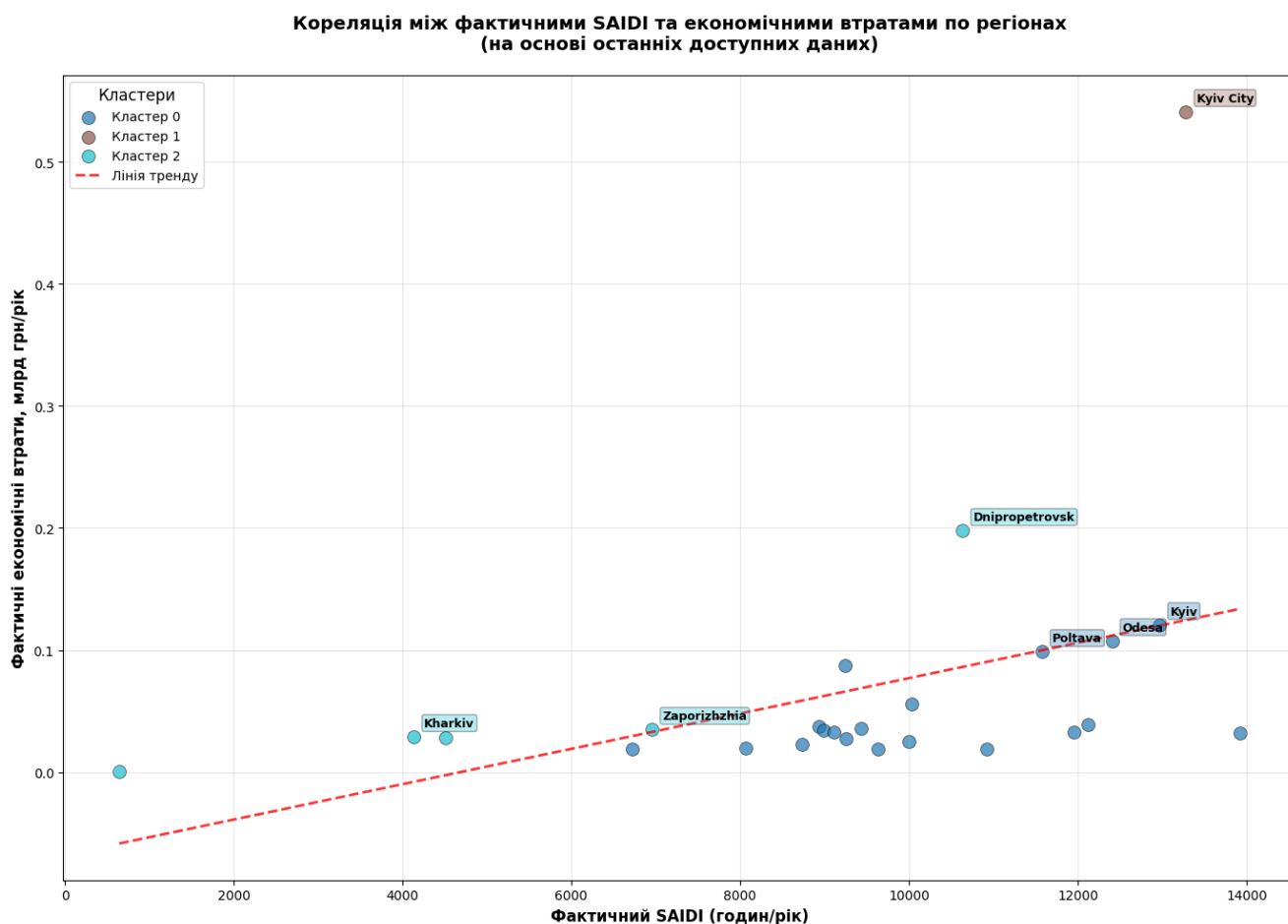


Рисунок 3.4 – Кореляція між фактичними значеннями SAIDI та економічними втратами за регіонами

Джерело: розраховано та побудовано автором на основі даних [48; 49; 50; 51; 52; 53]

Найбільші економічні збитки спостерігаються в Києві. При середньому показнику SAIDI близько 13–14 тис. годин/рік вартість економічних збитків перевищує 0,5 млрд грн/рік, що значно вище, ніж в інших регіонах. Це пов'язано з підвищеною концентрацією підприємницької діяльності, великою часткою галузей з підвищеною доданою вартістю (ІТ, фінанси, послуги) та значною щільністю населення.

Другі за величиною економічні збитки зазнала Дніпропетровська область, яка поєднує потужну промислову базу та енергоємне виробництво. Незважаючи на нижчий показник SAIDI (близько 10 тис. годин/рік), збитки досягають $\approx 0,2$ млрд

грн/рік, що свідчить про високу чутливість промислового сектору до перебоїв у електропостачанні.

Трохи менші втрати характерні для Полтавської, Одеської та Київської областей, які групуються в діапазоні SAIDI 11 – 12 тис. годин/рік економічні збитки становлять приблизно один мільярд гривень на рік. Отже, цей регіон характеризується сприятливими інвестиційними перспективами у інноваційні проекти та помірним станом відключень електроенергії.

Харків та Запоріжжя зафіксували найнижчі рівні перебоїв, де значення SAIDI (середній час перебоїв у системі) становило від 4000 до 8000 хв. Це пов'язано з впливом військової кампанії, яка змусила багато підприємств припинити свою діяльність або втратити виробничі потужності. Як наслідок, виробництво електроенергії зменшилося, що пом'якшило економічний вплив перебоїв у постачанні електроенергії.

Найнижчі показники були зафіксовані в східних і прикордонних областях. Тут збитки та SAIDI є низькими, що потенційно вказує на низьку щільність виробництва або, в деяких випадках, низьке споживання енергії на одиницю економічної продукції.

Основним кроком на даному етапі є побудова індексу економічної безпеки. Для кластера 0 (рис. 3.5), що включає переважно області з помірним розвитком промисловості та сільського господарства, у 2016 – 2020 рр. спостерігався стабільно високий рівень економічної безпеки – середній та високий IES коливався в межах 0,89–0,99. Однак із 2021 р. почалося поступове зниження показника – спочатку до 0,817 у 2022 р., а далі до 0,767 у 2024 р., що свідчить про перехід у середній рівень економічної безпеки.

Причини падіння можуть бути пов'язані зі зниженням інноваційної діяльності, інфляційними процесами та зниженням інвестиційної активності, особливо в умовах війни.



Рисунок 3.5 – Середній індекс економічної безпеки під впливом факторів стратегічних інновацій для кластера 0

Джерело: розраховано та побудовано автором на основі даних [48; 49; 50; 51; 52; 53]

Для міста Києва до 2020 року індекс мав максимальні значення ~0,998, що свідчило про високу стабільність економіки та розвинену інфраструктуру. Після 2021 року відбулося різке падіння до 0,832, а у до 2024 року – близько 0,697, що нижче за поріг середнього рівня (рис. 3.6).



Рисунок 3.6 – Середній індекс економічної безпеки під впливом факторів стратегічних інновацій для кластера 1

Джерело: розраховано та побудовано автором на основі даних [48; 49; 50; 51; 52; 53]

Це вказує на суттєве погіршення економічної безпеки навіть у найбільш економічно потужних регіонах. Ймовірними чинниками є зростання вартості

енергетичних ризиків, релокація бізнесів, масову міграцію населення, зниження обсягів виробництва та вплив воєнних дій на фінансову стабільність.

Для кластера 2 (рис. 3.7) із 2016 по 2020 рік IES зберігався майже на тому ж рівні. Після 2021 року відбулося зниження – до 0,877 у 2024 р., що змусило перейти кластер у середній рівень за індексом економічної безпеки.



Рисунок 3.7 – Середній індекс економічної безпеки під впливом факторів стратегічних інновацій для кластера 2

Джерело: розраховано та побудовано автором на основі даних [48; 49; 50; 51; 52; 53]

Загалом спостерігається тенденція до зниження показника безпеки внаслідок кризової динаміки в енергетичному секторі, що проявляється у зростанні частоти та тривалості відключень електроенергії, погіршенні технічного стану мережевої інфраструктури, а також у неможливості реалізації інноваційних проєктів у енергетичній галузі.

Зважаючи на те, що основна модель є залежною від вихідного припущення $\alpha = 0,2$, необхідно здійснити аналіз чутливості. На цьому етапі аналізується, як будуть змінюватися агреговані економічні збитки залежно від зміни коефіцієнта α , у наведеному дослідженні – від 0,1 до 0,3. Це дозволяє визначити діапазон можливих збитків і підвищує надійність висновків, демонструючи їх стійкість до зміни початкових припущень.

Для прогнозування потенційних витрат які можна уникнути за різними сценаріями розраховано показник, який підраховує різницю між втратами у реалістичному та оптимістичному/песимістичному сценаріях.

3.2 Економічні рішення підвищення економічної безпеки енергетичного сектору на основі стратегування інновацій

Український енергетичний сектор перебуває на етапі значних трансформаційних змін, тому для забезпечення економічної безпеки галузі доцільно розглянути сценарії розвитку енергетичного сектору. Аналітичне дослідження дозволить сформувати рекомендації, які вплинуть на покращення індикаторів економічної безпеки енергетичного сектору шляхом застосування політики інвестування у стратегічні інновації.

Загалом, виділяють ряд проблем, які постають перед енергетичним сектором.

По-перше, це погіршення надійності електропостачання, адже зношеність енергетичних мереж і дефіцит ресурсів порушують транспортні ланцюги електроенергії, що послаблює економічну безпеку енергетичного сектору.

Другою проблемою є асиметрія регіонального розвитку. Високоіндустріальні регіони значно відрізняються за обсягом енергетичної ємності валового регіонального продукту відносно аграрних та прифронтових регіонів. Диспропорції у інвестиційному забезпеченні призводять до послаблення економічної безпеки енергетичного комплексу.

Ще однією проблемою є складність адаптації та застосування новітніх технологічних рішень у енергетичному секторі. Енергетична система функціонує в умовах критичних руйнувань виробничих потужностей та мереж передачі, зниження інвестиційної активності, що спричиняє падіння рівня інновацій у найбільш нестабільних регіонах і, як наслідок, зниження економічної безпеки сектору.

З метою зниження показника SAIDI та покращення економічної безпеки енергетичного сектору, розробляється набір інноваційних стратегічних рекомендацій, що дозволяють у межах трьох сценаріїв (деградації системи, її підтримки на поточному рівні та оптимістичного розвитку) сформувати та визначити потенційні наслідки у кількісному еквіваленті.

Згідно з проведеним економетричним аналізом, для обраних детермінант, які впливають на показник тривалості відключень, доцільною є оцінка значення для різних регіонів держави. Інновації наразі демонструють тенденцію до зниження внаслідок системної вразливості, що загрожує економічній безпеці сектору та призводить до деградації системи. Через недостатність капіталовкладень тривалість відключень лише зростає.

Інновації, як один із факторів, що впливають на тривалість відключень, полягають не лише у впровадженні нових технологій, а й у зміні операційних моделей і регуляторних підходів. Такий підхід дозволяє збільшити використання розподіленої генерації в регіонах та зменшити залежність від централізованого постачання електроенергії. Також важливо розвивати агротехнології, які були б незалежними у співпраці, і покращувати їх якісну складову через інвестиції у “зелену” енергетику. Зокрема, розміщувати сонячні панелі, які змогли б підвищити енергонезалежність регіонів та їхню енергоефективність.

Україна наразі володіє значним потенціалом у сфері виробництва біогазу та біометану. Адже відповідно до оцінок експертів проєкту біоенергетики у співпраці з Державним агентством з енергоефективності та енергозбереження, Україна втрачає близько 7,8 мільярдів метрів кубічних біометану щорічно, які вона могла б використовувати для виробництва електричної енергії [57].

У такому контексті найбільш перспективними напрямками та областями для розвитку економіки є Вінницька, Полтавська та Черкаська області, які, можливо, і не мають значних виробничих потужностей у металургії чи видобутку (крім газового видобутку для Полтавської області), однак все ж мають потенційні можливості щодо розвитку аграрного сектору і можуть стати аграрно-інвестиційними хабами для впровадження біогазових установок через диспетчеризовану систему генерації. Таким чином, у поєднанні із установками зберігання енергії, вказані області могли б стати більш енергонезалежними.

Щодо західних регіонів, то для підтримки економічної безпеки важливо розвивати вітрову енергетику. Зокрема, у Карпатах такі проєкти наразі вже створюються, однак деталі їхньої діяльності не розголошуються з метою

забезпечення безпечного доступу та захисту від потенційних загроз. Також для Львівської області, яка наразі є великим хабом для переселенців України із прифронтових територій, актуальним є фокус на створення індустріальних парків типу Best Access із впровадженням систем накопичення електричної енергії, як, наприклад, в Айзельштадті в Австрії. У цьому місці було встановлено інтегровану систему за проєктом SMILE в установах зберігання енергії, які дозволили підтримувати стабільність технологічного промислового парку і покращити його енергонезалежність як одну із складових економічної безпеки [58].

Серед інших можливостей впровадження інноваційних рішень у галузі енергетики є формування акселераторів стартапів для залучення інвестицій на кшталт Ukrainian Multi-Donor Development Finance Platform, яка забезпечує інвестиції в розмірі до 3 млн грн на проєкт для компаній оборотом від 5 млн доларів. Щодо областей поліського регіону, то загалом Житомирська та Волинська області, маючи значні площі лісового масиву, матимуть можливість отримувати державні субсидії на трансформацію деревообробної промисловості, роблячи її більш енергонезалежною, та використовувати можливості програми державного енергоаудиту, впроваджуючи стандарти енергоефективності відповідно до Європейської директиви, які дозволять зекономити близько 20% енергії [58; 59].

Для південних областей, зокрема Миколаївської та Херсонської, незважаючи на значні руйнування об'єктів відновлюваної генерації, регіон зберігає високий потенціал розвитку сонячної та вітрової енергетики завдяки сприятливим природним умовам. Також можливе встановлення дахових сонячних панелей за моделлю німецької Energiewende, яка об'єднала близько 2 млн об'єктів приватної генерації в енергоагрегуючі системи, що підключаються до мережі у дистанційному форматі [60].

Для областей, де є атомні електростанції, зокрема Рівненської, Хмельницької, а також частково Запорізької, доцільним є створення енергопромислових кластерів та енергоємних виробництв. Такі інноваційні об'єкти інфраструктури могли б працювати у форматі нон-стоп завдяки стабільному навантаженню, і, зокрема, виробництву водню. Хаби обробки даних на основі базового навантаження

споживали б електричну енергію та дозволяли б інвестувати саме в українську енергетичну галузь, що слугувало б важливим індикатором стану економічної безпеки регіонів[61].

Одним із ключових напрямів розвитку виступає впровадження відновлювальних джерел енергії та розумних мереж, що забезпечують автоматизацію управління електропостачанням. Зокрема, у межах програми DTEK Grids, яка охоплює інфраструктуру Київського регіону, протягом останніх років реалізується масштабне фінансування систем Smart Grid. Додатково близько 86 млн євро на зміцнення критичної інфраструктури спрямовуються Європейським інвестиційним банком та Європейським Союзом у межах спільних програм підтримки економіки України [59].

Відтак пріоритетними напрямками розвитку вважаються інноваційні заходи, спрямовані на забезпечення стійкості та укріплення української генерації, зокрема в столиці. Перспективний потенціал міститься у розширенні інфраструктури накопичення енергії та розвитку мікромереж у межах міської території. Житлова інфраструктура та муніципалітети мають формувати інноваційні механізми на базі систем розподіленої генерації, а також забезпечувати оперативне інформування щодо можливих негативних впливів на роботу енергосистеми та економіки в цілому.

Області кластера 2 характеризуються високим рівнем індустріалізації, значним енергоспоживанням, а також – враховуючи геополітичний контекст – підвищеною вразливістю енергомережі через пошкодження інфраструктури та часті атаки. У цих умовах основними напрямками інвестування мають стати: забезпечення безперебійного функціонування мереж, модернізація магістральних електропроводів, створення систем накопичення енергії (BESS) для критичних об'єктів. Ліквідація наслідків бойових дій відіграє надзвичайно важливу роль, але станом на сьогодні навіть кілька мільйонів гектарів швидко занепадають через відсутність екологічно безпечного середовища.

Як представник агломерації, де розташована найбільша атомна електростанція, Запорізька область повинна стати хабом для інвестування в

підтримку мережевої інфраструктури енергетичного сектору регіону. Це забезпечить громадськість регіону достатньою кількістю електричної ядерної енергії. На сьогоднішній день доступ до АЕС обмежений, тому вкрай важливо формувати резервні мережі, системи резервного живлення та акумулювання енергії для мінімізації потенційних втрат. У Дніпропетровській області вже реалізовано приклад великого проєкту: компанія DTEK інвестувала близько 125 млн євро в 200 МВт батарейних накопичувачів, розгорнутих у Київській та Дніпропетровській областях, що підвищує економічну стійкість енергосистеми та скоротило ризик відключень[62].

У Донецькій та Луганській областях, де найбільшою мірою відзначається руйнування енергетичної та промислової інфраструктури, ключове значення для підтримки достатнього рівня економічної безпеки набувають довгострокові інвестиції у відновлення та трансформацію. Наразі ці регіони створюють засоби зберігання енергії як частину першої фази «підтримки існуючої системи», а у післявоєнний період можливими стратегічними кроками є стимулювання малих і середніх підприємств, розвиток логістики, переробки, створення нової виробничої бази на зразок кейсів польських чи балканських регіонів (наприклад, програми реконструкції з інноваціями у післявоєнний період). Таким чином планується реалізувати модель «build better than before» – тобто відбудувати краще, ніж було раніше, сприяючи поступовому переходу регіонів до більш стабільної моделі розвитку економічної безпеки галузі.

Станом на вересень 2025 року вже сформовано значну кількість інноваційних проєктів розвитку енергетичного сектору, які частково фінансуються за донорські кошти. Це дозволяє бізнесам та громадам підтримувати високу забезпеченість електропостачанням внаслідок ефективного використання ресурсів(табл. 3.1).

Таблиця 3.1 – Орієнтовний бюджет інвестування у сучасні інноваційні рішення, необхідні для підвищення економічної безпеки енергетичного сектору за областями надходження станом на вересень 2025 р., млн грн

Область	Відновлювана вітроенергетика, млн грн	Геотермальна енергетика, млн грн	Відновлювана гідроенергетика, млн грн	Біопаливо або енергетична біосировина млн грн	Сонячна енергетика, млн грн	Невідновлювана енергетика, млн грн	Передача та розподіл енергії, млн грн
Вінницька	-	-	-	33	1	42	-
Волинська	-	-	-	-	2	61	-
Дніпропетровська	-	51	1	-	49	43	3,116
Донецька	-	-	-	-	90	-	-
Житомирська	-	-	-	-	-	268	512
Закарпатська	-	-	-	-	3	23	-
Запорізька	-	-	-	-	-	348	-
Івано-Франківська	-	-	-	-	0	-	-
Київська	-	-	-	-	-	73	42
Кіровоградська	-	-	-	833	27	57	-
Львівська	-	187	-	-	4	26	-
м. Київ	-	-	-	-	-	34,080	290
Миколаївська	4,973	-	-	-	879	12,748	-
Одеська	-	-	-	-	186	261	163
Полтавська	10,224	-	-	5,700	5,604	26,095	-
Рівненська	-	-	-	-	-	20	-
Сумська	-	-	-	-	3	505	-
Тернопільська	-	-	-	-	1	-	-
Харківська	-	-	-	-	-	1,349	30
Херсонська	-	-	-	-	-	-	-
Хмельницька	-	-	-	-	3	31	-
Черкаська	-	-	-	-	35	14	2
Чернівецька	-	13	-	3,118	3	852	4
Чернігівська	-	-	-	71	5	1	-

Джерело: розраховано та побудовано автором на основі даних [48; 49; 50; 51; 52; 53]

Отже, підтримка інвестиційної активності у регіонах є ключовим чинником забезпечення економічної безпеки енергетичного сектору держави. Системна політика стимулювання приватного капіталу, розвиток державно-приватного партнерства та ефективне використання міжнародної допомоги мають стати

базовими умовами для підвищення стійкості регіональних економік і зниження значення індикаторів, пов'язаних із енергетичною вразливістю.

Наступним чинником, який істотно впливає на показник економічної безпеки енергетичної інфраструктури, виступає оборонний чинник, що є пріоритетом у формуванні рівня надійності системи електропостачання. Усі досліджувані моделі підтверджують, що саме цей фактор є одним із базових детермінант, які визначають середню тривалість відключень споживачів. У нинішніх умовах безпекова складова набуває вирішального значення, тому що кількість атак на енергетичну інфраструктуру безпосередньо стосується ураження і, як наслідок, частоти виникнення надзвичайних ситуацій [36; 63].

Загалом стратегічні інновації в галузі економічної безпеки енергетичного сектору передбачають не тільки цифровізацію процесів управління, а й фізичне зміцнення об'єктів виробництва, розподілу та зберігання енергії. Зважаючи на безпековий ландшафт, у короткостроковій та середньостроковій перспективі першочерговими заходами є спорудження постійних інженерних конструкцій. Це можуть бути зокрема залізобетонні укриття або саркофаги для трансформаторних підстанцій та обладнання розподільчих підстанцій, а також утворення мережеских коридорів з розподіленою електрогенерацією. Завдяки цьому вдасться мінімізувати можливості знеструмлення одночасно багатьох важливих об'єктів та забезпечити функціонування української енергетичної системи навіть за повторення обстрілів. У межах року можна розглядати три базові сценарії ескалації атак на енергетичну інфраструктуру.

Так згідно першого, кількість атак на об'єкти енергетики продовжує зростати, особливо у великих промислових центрах та енергетично навантажених регіонах (Дніпропетровська, Харківська, Київська області). У такому випадку пріоритетом мають стати середньо- та короткострокові інженерні рішення, серед яких підземне прокладання частини кабельних ліній. Ці кроки вимагають суттєвих капіталовкладень. Однак, саме вони допомагають скоротити частоту перебоїв у постачанні електроенергії та довгостроково стабілізувати значення економічної безпеки енергетичного сектору.

Другий варіант розвитку подій передбачає стабілізацію ситуації. У цьому контексті виникає питання про те, як саме слід впливати на розвиток енергосистеми. Інтенсивність атак знижується, але час від часу вони все ж виникають. У цьому випадку потрібно зробити акцент на розв'язуваннях проблем на локальному рівні, встановивши модулі мобільного енергопостачання, вкладаючи кошти в розробку системи резервного живлення та покращуючи взаємодію між операторами розподільчих мереж.

Третій сценарій розвитку подій є оптимістичним. Число атак зменшується завдяки сповільненню динаміки військового конфлікту або зміцненню систем протиповітряної оборони. У такому контексті фокус уваги повинен бути зосереджений на інвестиціях у розумні технології управління мережею: автоматичне балансування, цифрові твіннінгові об'єкти, діагностику мережі в режимі реального часу. Завдяки таким діям скорочуються втрати електроенергії та зменшуються тривалість перебоїв у постачанні електроенергії, підвищуючи економічну безпеку.

Співвідношення планових і фактичних відключень у розрізі регіонів України демонструє, що планове технічне обслуговування практично відсутнє. Мережа функціонує в суто аварійному режимі роботи з ремонтами, що проводяться лише після виникнення надзвичайних ситуацій. Саме тому доцільно здійснювати заходи щодо відновлення та стандартизації планових робіт, зокрема удосконалювати систему обслуговування мережі на рівні кожного регіону, що включає регулярні планові відключення, технічні огляди та заміну критичного обладнання до його відмови. Досвід європейських країн, таких як Німеччина та Швеція, показує, що регіональні оператори, які інтегрують регулярне планове обслуговування та цифровий моніторинг стану обладнання, досягають зниження SAIDI до 20–30% від середньорічного рівня за відсутності таких систем [64; 65; 66].

Загалом, динаміка атак за регіонами потенційно залишиться нерівномірною, що вимагає диференційованого підходу до інвестування у безпеку енергетичних об'єктів. Так, у прикордонних областях доцільно інвестувати у фізичне зміцнення інфраструктури, тоді як у центральних регіонах – у системи оперативного

резервування потужностей. Ігнорування цих аспектів, як свідчить поточна практика, призводить до зростання тривалості відключень, оскільки низка енергетичних компаній досі недооцінює важливість системної реалізації заходів безпеки та розвитку інженерного захисту. Досвід європейських сусідів підтверджує, що рекомендовані вище заходи дозволяють скоротити середню тривалість відключень, підвищити надійність постачання та створити стійку основу для цифрової трансформації енергетичного сектору, адаптовану до особливостей регіональних економік.

3.3 Прогностична аналітика стратегічних інновацій та сценарне моделювання підвищення економічної безпеки енергетичного сектору

Спираючись на розроблені рекомендації та методологічні підходи до прогнозування незалежних чинників сформовано матриці даних. Вони дозволяють визначити вплив рекомендацій на шляхи розвитку енергетичної системи у розрізі формування трьох сценаріїв зміни рівня економічної безпеки енергетичного сектору.

Аналізуючи запропоновані заходи для реалізації у енергетичному секторі щодо кластера 0, очевидною є необхідність збільшення інвестицій у енергетичний сектор для розвитку економічної незалежності сектору шляхом підтримання курсу наближення до міжнародних стандартів виробництва зеленої енергії в умовах євроінтеграції. На основі запропонованих сценаріїв здійснені розрахунки (рис. 3.8), які, за умови реалізації, відповідатимуть значенню оптимістичного сценарію інвестицій у регіони.

У короткостроковій перспективі згортання інвестицій призведе до зниження темпів модернізації електромереж, збільшення тривалості та частоти відключень, що проявиться у погіршенні показників SAIDI і, як результат, зниження економічної безпеки.

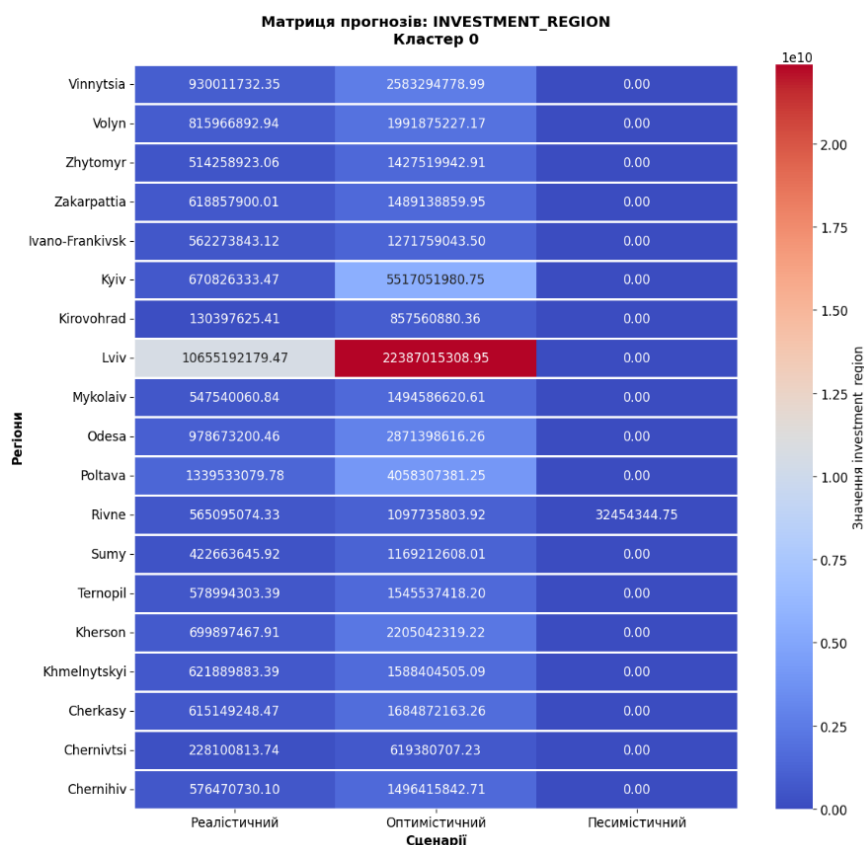


Рисунок 3.8 – Прогнозовані обсяги залучених у регіони інвестицій для впровадження інновацій відповідно до запропонованих рекомендацій для кластера 0

Джерело: розраховано та побудовано автором на основі даних [48; 49; 50; 51; 52; 53]

У середньо- та довгостроковому періоді очікується падіння продуктивних інвестицій у переробку, логістику та промисловість, зниження бізнес-привабливості регіонів і посилення їхньої залежності від централізованих енергетичних систем. Соціально-економічні процеси полягатимуть у зростанні безробіття, скороченні чисельності населення як у сільській, так і в міській місцевості, а також зменшенні кількості робочих місць. Для міста Києва як найбільшого центру споживання та розподілу електричної енергії інвестиційна активність наразі спрямована на розвиток розподіленої генерації та забезпечення безперебійного функціонування критичної інфраструктури.

Сучасні капіталовкладення концентруються переважно на модернізації розподільчих мереж, оперативній ліквідації аварій, підвищенні кіберстійкості

систем розподілу електроенергії, а також на заходах із підвищення енергоефективності та раціонального енергоспоживання.

Поєднання перспективних напрямів розвитку із чинною інвестиційною активністю створює передумови для формування більш стійкої та захищеної енергетичної системи міста Києва, що відповідає оптимістичному сценарію розвитку. Водночас Київ наразі володіє достатніми обсягами власної генерації, зокрема у вигляді теплових електростанцій, які, попри постійні атаки, продовжують функціонувати. Саме тому підтримка й зміцнення міської енергетичної інфраструктури залишається критично важливим завданням для підвищення рівня економічної безпеки енергетичного сектору (рис. 3.9).

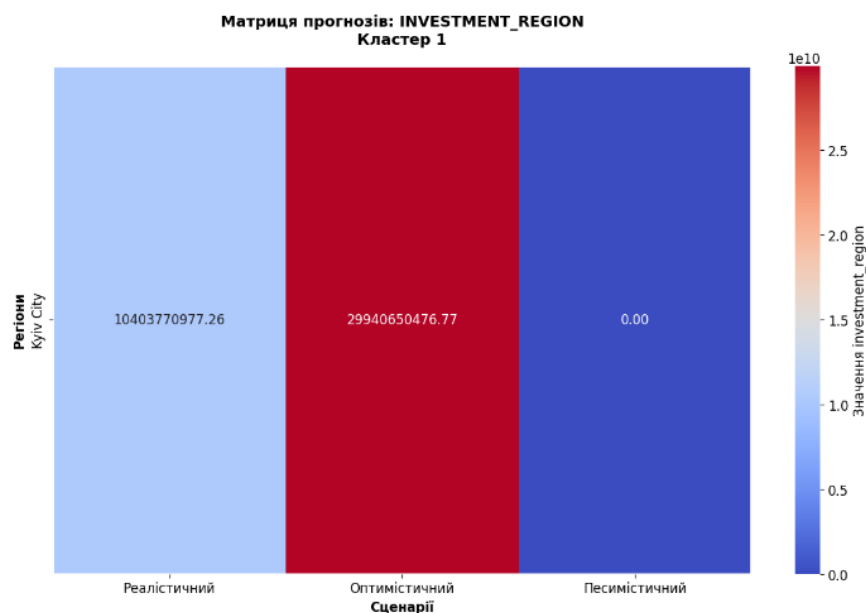


Рисунок 3.9 – Прогнозовані обсяги залучених у регіони інвестицій для впровадження інновацій відповідно до запропонованих рекомендацій для кластера 1

Джерело: розраховано та побудовано автором на основі даних [48; 49; 50; 51; 52; 53]

Розрахунки щодо потенційного обсягу інвестицій на 2025 рік для кластера 2 відображено на рис. 3.10.

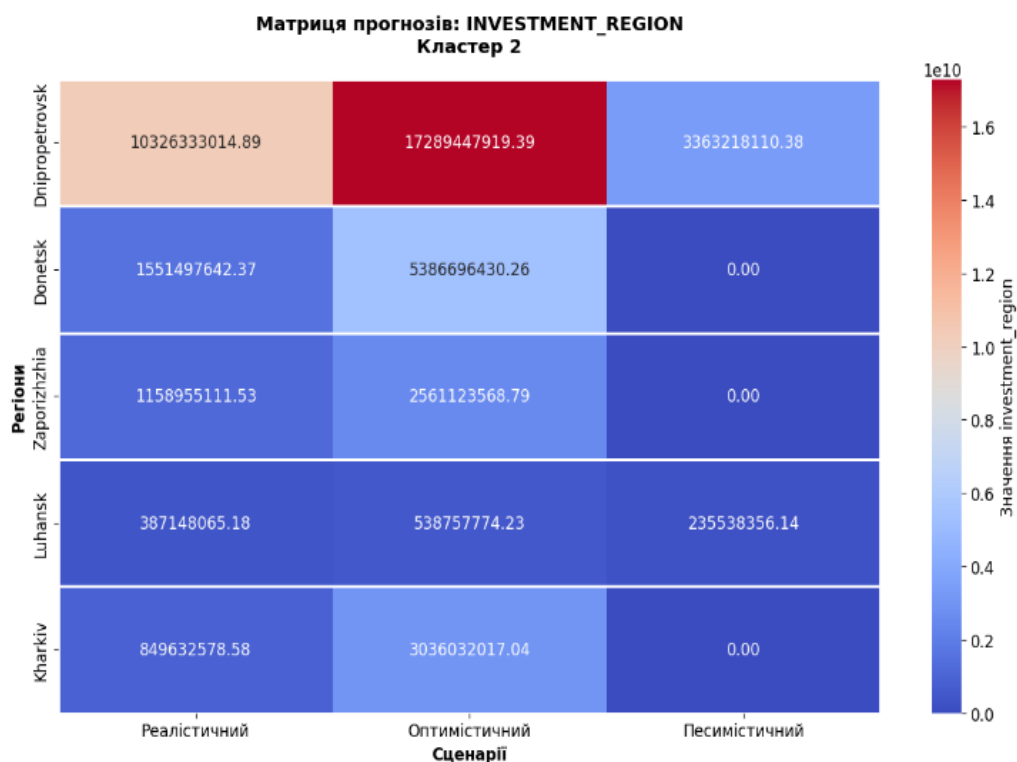


Рисунок 3.10 – Прогнозовані обсяги залучених у регіони інвестицій для впровадження інновацій відповідно до запропонованих рекомендацій для кластера 2

Джерело: розраховано та побудовано автором на основі даних [48; 49; 50; 51; 52; 53]

Станом на сьогодні більшість інвестицій у кластері 2 спрямована не на масштабну трансформацію, а на утримання функціональності існуючої енергосистеми, що пояснюється високим рівнем ризику і неможливістю доступу до критичної інфраструктури, яка розташована на окупованих територіях. Стратегія підтримання поточного стану зумовлена військовими діями на території держави. Однак без переходу до проактивних інвестиційних програм потенційні негативні наслідки залишаються високими.

Згідно до прогнозних моделей існує три основні сценарії зміни кількості атак на енергетичну інфраструктуру (рис. 3.11)

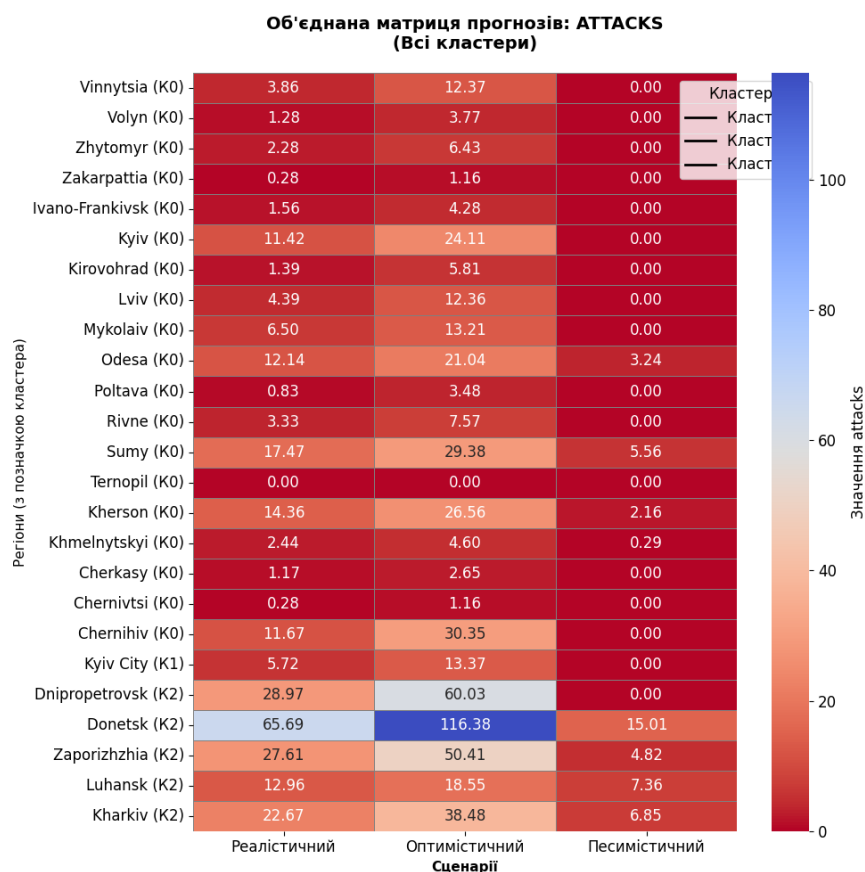


Рисунок 3.11 – Прогнозовані обсяги атак на енергетичну інфраструктуру за регіонами відповідно до трьох сценаріїв

Джерело: розраховано та побудовано автором на основі даних [48; 49; 50; 51; 52; 53]

Так, найбільш ймовірним варіантом залишається збереження поточного стану кількості атак за регіонами, водночас згідно трьох сценаріїв можливе погіршення стану або призупинення бойових дій, що наразі є малоімовірним.

Для визначення потенційного впливу рекомендацій на показник відношення планових до фактичних відключень також застосовано сценарний підхід розвитку (рис. 3.12), так, перехід від реактивного (0,00) до проактивного сценарію (0,39–0,76 залежно від регіону) може знизити SAIDI на десятки годин на рік, що корелює зі зменшенням економічних втрат регіональної економіки.

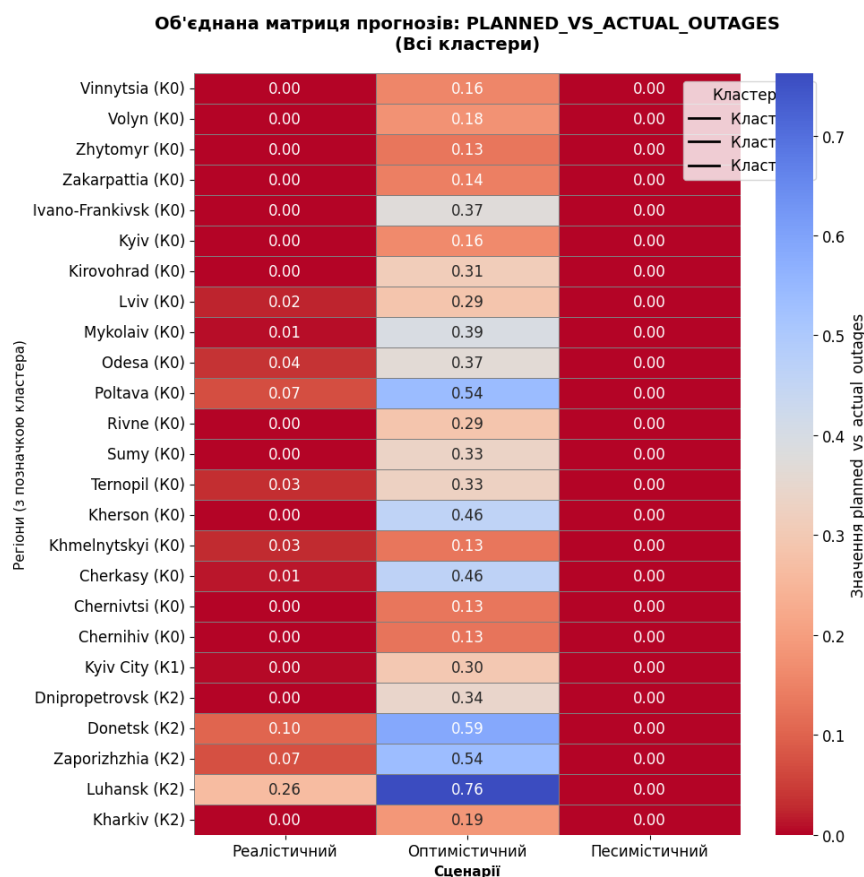


Рисунок 3.12 – Прогнозовані відношення планових до фактичних відключень електроенергії за регіонами відповідно до трьох сценаріїв

Джерело: розраховано та побудовано автором на основі даних [48; 49; 50; 51; 52; 53]

А зважаючи на те, що окремі регіони, такі як Дніпропетровська та Харківська області, потребують пріоритетного впровадження планових робіт та модернізації обладнання, важливим є застосування механізмів фінансових стимулів та державних програм підтримки інноваційних рішень, аналогічно до практики Польщі, де регіональні програми модернізації енергомереж дозволили підвищити надійність постачання у промислових центрах на 30–40%.

Високий рівень впровадження розумних мереж спостерігається у густонаселених та промислово активних регіонах (Івано-Франківська, Київська, Одеська, Вінницька), де лінії електропостачання складні та перевантажені (рис. 3.13).

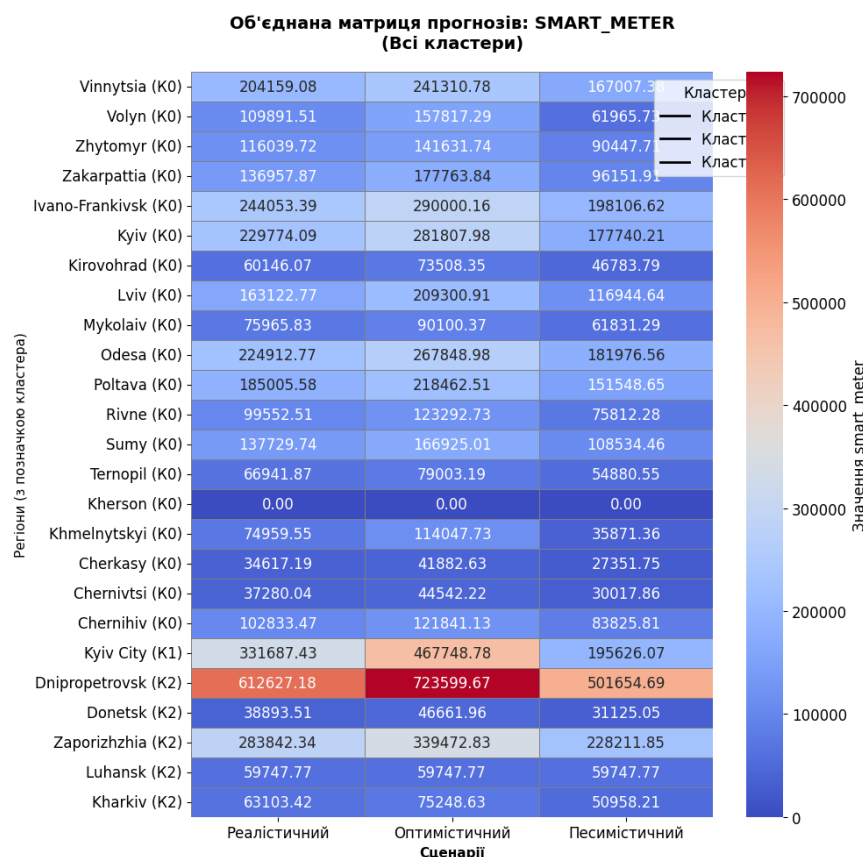


Рисунок 3.13 – Прогнозовані обсяги встановлення розумних лічильників за регіонами відповідно до трьох сценаріїв

Джерело: розраховано та побудовано автором на основі даних [48; 49; 50; 51; 52; 53]

Впровадження інтелектуальних систем обліку (AMI) є довгостроковим та капіталомістким процесом, що характеризується високою інерційністю: для більшості регіонів кластера 0 прогнозовані значення «Оптимістичного» та «Песимістичного» сценаріїв демонструють стабільність з низьким розкидом (36–47%), що свідчить про планомірну реалізацію інвестиційних програм. Водночас Хмельницька та Волинська області перебувають на «інвестиційному роздоріжжі», де майбутнє цифровізації критично залежить від державних рішень, а Херсонська область демонструє повний колапс планування через продовження руйнування інфраструктури.

У межах реалізованого сценарного моделювання, на основі сформованих рекомендацій та значень незалежних чинників впливу на енергетичну й економічну

безпеку, було отримано прогнозні значення показника SAIDI для трьох кластерів регіонів України. Методологія сценарного аналізу була синхронізована з підходом, застосованим до незалежних змінних: реалістичний сценарій відображає інерційне продовження наявного тренду; оптимістичний відповідає ситуації, за якої SAIDI набуває найнижчих можливих значень (тобто тривалість відключень мінімізується); песимістичний – сценарію максимізації ризиків, за якого тривалість відключень є найбільшою. Це відповідає інтерпретації індексу економічної безпеки, згідно з якою оптимістичний сценарій відповідає вищому рівню стійкості енергетичної системи, досягнутому завдяки зменшенню кількості атак, збільшенню інвестицій та посиленню цифровізації мереж.

У кластері 0 відбувається суттєве зростання індексу економічної безпеки порівняно з 2024 роком за усіма сценаріями (рис. 3.14). У межах реалістичного сценарію величина індексу SAIDI зменшується у середньому на 30,1%, спостерігається відновлення об'єктів інфраструктури. Середнє скорочення становить 68,2% та 10,9% у межах оптимістичного та песимістичного сценаріїв відповідно. Між регіонами кластера спостерігається істотна гетерогенність, не зважаючи на загальну позитивну динаміку.

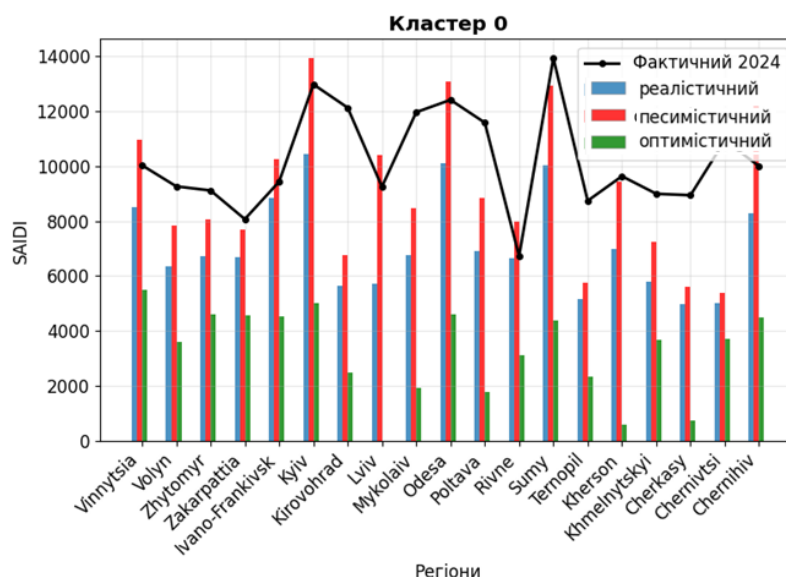


Рисунок 3.14 – Прогнозне значення SAIDI за трьома сценаріями для кластера 0

Джерело: розраховано та побудовано автором на основі даних [48; 49; 50; 51; 52; 53]

За реалістичного сценарію очікується, що найвищі показники SAIDI будуть у Київській, Одеській, Сумській, Івано-Франківській та Вінницькій областях. Пояснення відповідає високій щільності населення та складності функціонування мережевої інфраструктури областей. Водночас за оптимістичного сценарію очікуються найнижчі показники для Львівської, Черкаської, Херсонської, Полтавської та Миколаївської областей, де існує значний потенціал для підвищення стійкості енергосистеми. За песимістичним сценарієм група регіонів із найвищими значеннями SAIDI зберігається подібною: Київська, Одеська, Чернігівська, Львівська та Вінницька області.

Кластер 1, представлений містом Києвом, характеризується особливо високою чутливістю до сценарних змін (рис. 3.15).

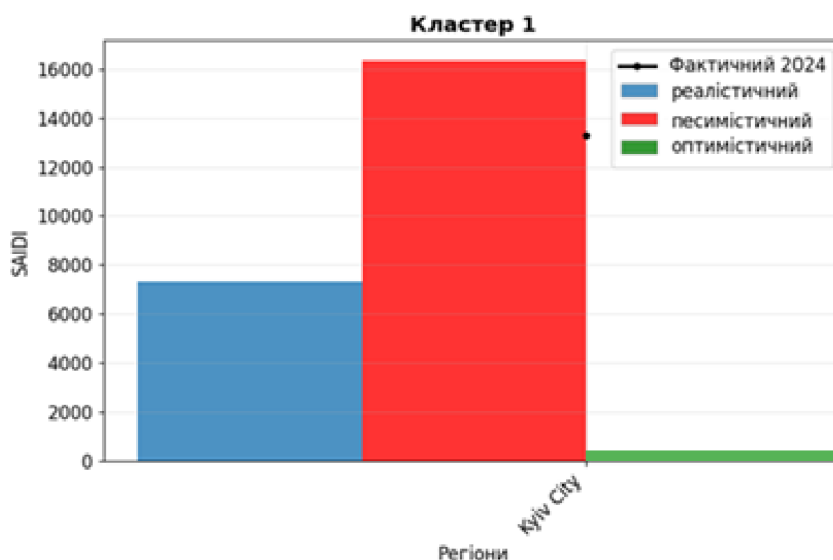


Рисунок 3.15 – Прогнозне значення SAIDI за трьома сценаріями для кластера 1

Джерело: розраховано та побудовано автором на основі даних [48; 49; 50; 51; 52; 53]

Фактичне значення SAIDI у 2024 році становило близько 13 тис. хв. на особу. За реалістичного сценарію прогнозується зменшення до 7,3 тис. хв. (-44,9%), що є наслідком нормалізації роботи розподільчих мереж і посилення інвестицій у їх захист. За умов оптимістичного сценарію, коли рівень атак є мінімальним, а інвестиції – максимальними, відключення фактично не

прогнозуються, що є результатом збалансованої взаємодії інфраструктурного укріплення та розвитку інноваційних видів генерації. Натомість песимістичний сценарій передбачає приріст до 16,3 тис. хв. (на 23% більше порівняно з 2024 роком), що відображає потенційний вплив високої інтенсивності атак і зниження капітальних вкладень у міську енергетичну інфраструктуру.

Кластер 2 демонструє дещо інший профіль ризику (рис. 3.16).

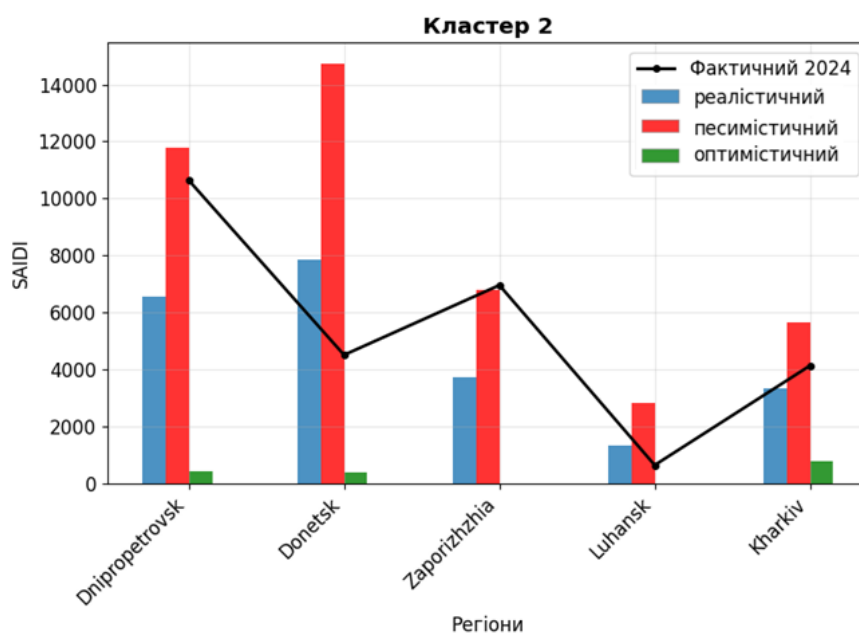


Рисунок 3.16 – Прогнозне значення SAIDI за трьома сценаріями для кластера 2

Джерело: розраховано та побудовано автором на основі даних [48; 49; 50; 51; 52; 53]

За фактичного значення SAIDI у 2024 році на рівні 3,4 тис. хв., за реалістичного сценарію прогнозується середнє зниження на 15,2%, що зумовлено поєднанням відновлювальних робіт та адаптації інфраструктури до бойових умов. За оптимістичного сценарію, за умови різкого зниження атак і суттєвих інвестицій, зниження SAIDI зменшилося б до 93%. Водночас песимістичний сценарій передбачає приріст до 8,4 тис. хв. на особу, що практично подвоює тривалість відключень. Найбільші значення SAIDI у всіх сценаріях прогнозуються для Донецької, Дніпропетровської, Харківської та Запорізької областей, що

підтверджує їхню критичну вразливість через розташування в зоні інтенсивних бойових дій та низькі обсяги фінансування інноваційних розробок.

Узагальнюючи результати прогнозування показника тривалості відключень трьох кластерів, можна стверджувати, що за базовим сценарієм прогнозується системне та статистично значуще покращення рівня надійності електропостачання у всіх регіонах України (рис. 3.17). Поточні інвестиції в операційну діяльність, реконструкцію мереж та адаптацію до військових ризиків вже дають відчутні результати у вигляді стабілізації ситуації.

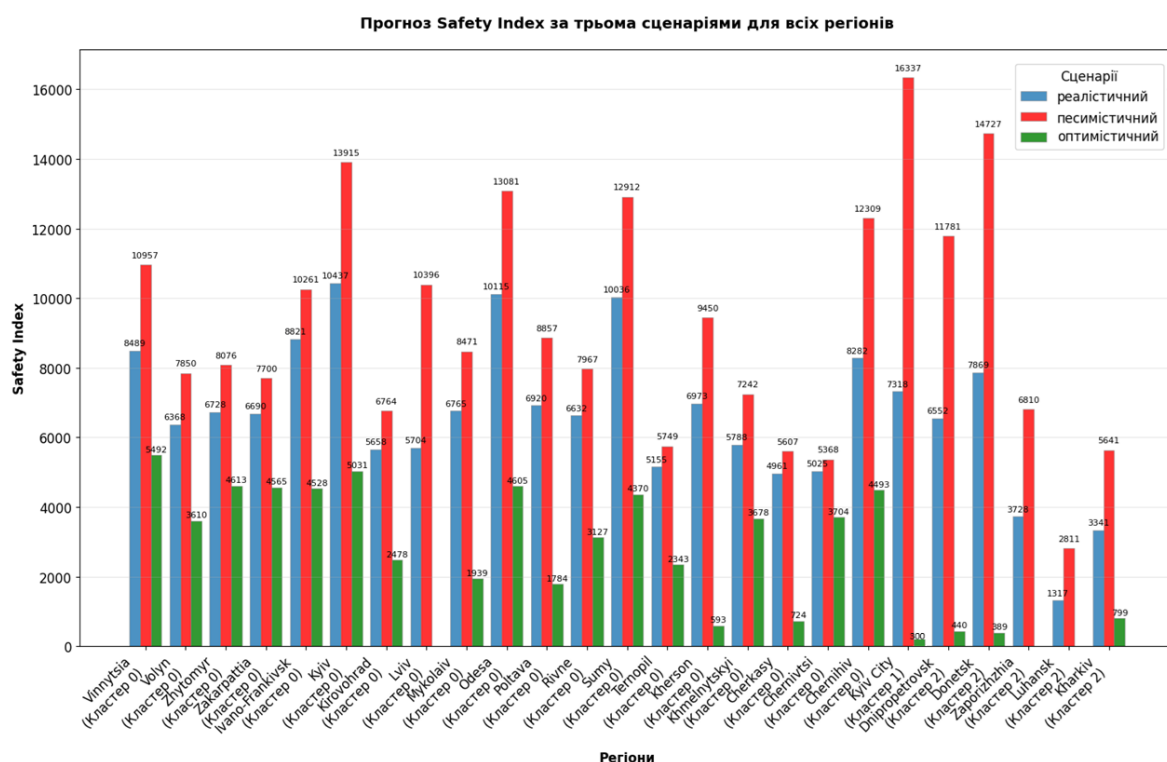


Рисунок 3.17 – Прогнозне значення SAIDI для всіх регіонів за трьома сценаріями

Джерело: розраховано та побудовано автором на основі даних [48; 49; 50; 51; 52; 53]

Утім, якщо проаналізувати розбіжності між сценаріями, то можна помітити очевидний факт: кластери 1 і 2 і надалі є найбільш вразливими до зовнішніх загроз. Це пояснюється рядом очевидних факторів: наближеність до лінії фронту, висока концентрація об'єктів критичної інфраструктури та значна залежність від залучення великих інвестицій. Сценарний аналіз лише підтверджує актуальність

постійного моніторингу стану енергетичного сектору, перегляду інвестиційних програм та розробки політики підвищення економічної безпеки енергетичного сектору з урахуванням особливостей кожного регіону.

У межах проведеного дослідження проаналізовано інтегральний показник економічної безпеки енергетичного сектору регіонів (IEC), який було сформовано на основі прогнозних значень SAIDI за трьома сценаріями розвитку. Індекс IEC відображає економічні наслідки зміни надійності електропостачання та є ключовим індикатором стійкості стратегічної аналітики регіональної енергосистеми до зовнішніх загроз. На основі отриманих результатів встановлено загальну закономірність: навіть за умов коливань прогнозних значень SAIDI у бік погіршення чи покращення, індекс економічної безпеки енергетичного сектору залишається відносно стабільним у межах кожного сценарію (рис. 3.18).

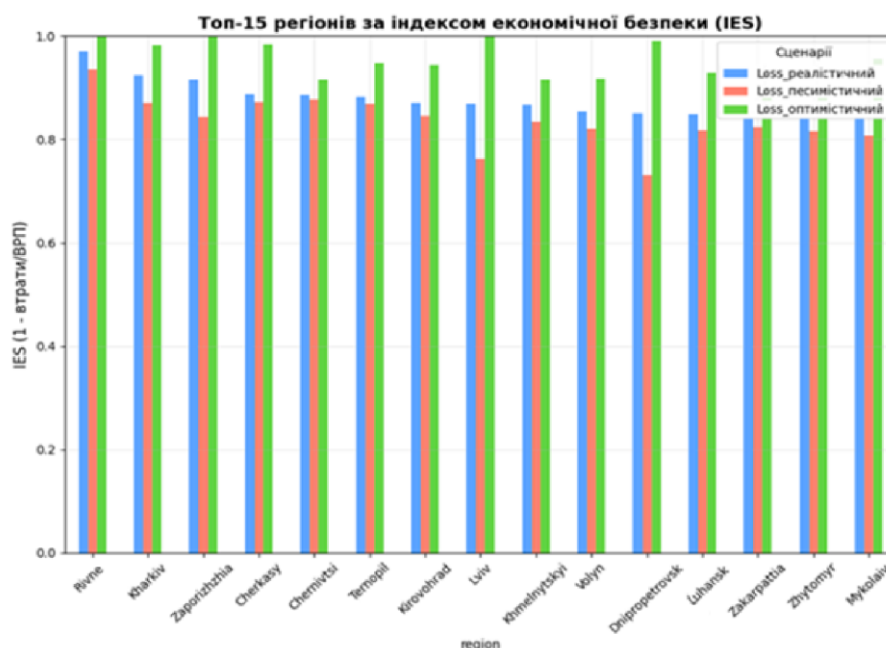


Рисунок 3.18 – Регіони з найкращими прогнозними показниками індексу економічної безпеки під впливом інноваційного розвитку енергетичного сектору згідно трьох сценаріїв у 2025 році за областями

Джерело: розраховано та побудовано автором на основі даних [48; 49; 50; 51; 52; 53]

У межах реалістичного сценарію показники Індексу коливалися від 0,7617 до 0,9699 із середнім рівнем 0,8487, що вказує на помірний, однак істотний рівень

незахищеності для більшості регіонів. У межах песимістичного сценарію граничні значення Індексу коливалися від 0,6270 до 0,9358 (в середньому 0,7890), що демонструє подальше зниження рівня безпеки на фоні очікуваного зростання потенційної тривалості відключень та зниження інноваційної діяльності в енергетичному секторі. З іншого боку, оптимістичний сценарій дозволив передбачити посилення енергетичної стійкості: величина індексу становила 0,8746–1,000, із середнім показником 0,9422, що відповідає припливу фінансових інвестицій у сектор і зниженню рівня чутливості регіональної економіки до припинення енергопостачання.

Оцінювання економічних втрат на основі частки економічної активності, чутливої до роботи енергетичної інфраструктури (параметр $\alpha = 0,2$), засвідчило, що за реалістичного сценарію середні втрати на один регіон становили близько 50 млн грн на рік. Серед регіонів із найбільшими втратами очікувано лідером стало місто Київ, яке характеризується високою концентрацією фінансової та енергетичної інфраструктури й інтенсивною логістичною розв'язкою. Найвище значення спостерігалось для Київської області на рівні 0,7617. За песимістичного сценарію середні витрати зростали до 70 млн грн, тоді як для міста Києва це значення може сягати до 670 млн грн на рік. На відміну від Києва, де фіксується критична залежність від безперебійності електропостачання, східні регіони не демонструють настільки різких коливань у кінцевому значенні індексу економічної безпеки енергетичного сектору.

За оптимістичним сценарієм середні витрати знижувалися до 10 млн грн на рік, для Київської області — максимум до 50 млн грн на рік. Щодо середнього рівня індексу економічної безпеки енергетичного сектору, то він становив 0,94. Це свідчить про посилення економічної стійкості у випадку відсутності або низької інтенсивності ракетних обстрілів.

У переліку регіонів, віднесених до групи з найбільш очікуваними витратами, опинилися Київ, Дніпропетровська, Київська та Одеська області. Водночас достатньо стійкими з позиції індексу економічної безпеки виявилася Черкаська область (рис. 3.19).

Додатково варто зазначити чутливість параметра α , який відображає зміну обсягу енергоспоживання в межах економічної активності та визначає рівень взаємозалежності між енергетичними та виробничими процесами. Зміна α від 0,1 до 0,3 засвідчила пропорційне зростання сумарних втрат: від 0,56 до 1,69 млрд грн на рік. Це підтверджує високу еластичність економічної стійкості до відносних змін надійності електропостачання, що підкреслює стратегічне значення інвестицій та інновацій у підвищення економічної безпеки енергетичного сектору.

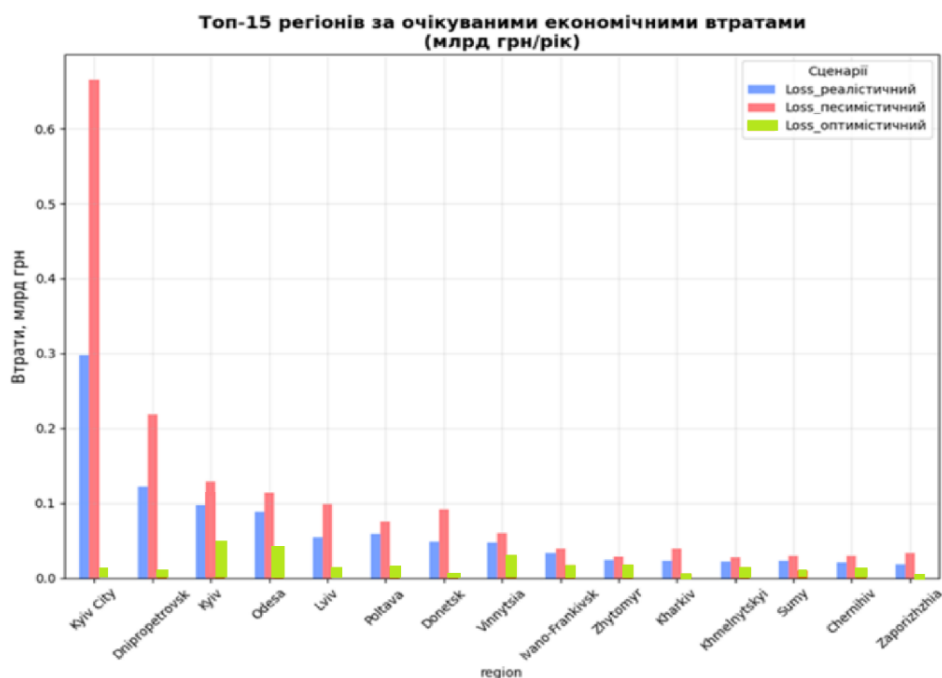


Рисунок 3.19 –Регіони з найбільшими очікуваними економічними втратами згідно трьох сценаріїв

Джерело: розраховано та побудовано автором на основі даних [48; 49; 50; 51; 52; 53]

У цілому результати моделювання свідчать, що відновлення та модернізація енергетичної інфраструктури, а також зменшення тривалості відключень мають виражений економічний ефект, формуючи основу для зміцнення економічної безпеки держави.

Висновки до третього розділу

У третьому розділі здійснено аналіз впливу стратегічних інновацій на забезпечення економічної безпеки енергетичного сектору України. Для цього сформовано аналітичний інструментарій структурування та збору даних, їхньої обробки з подальшим оцінюванням впливу інвестицій на скорочення економічних втрат. Застосована методика поєднала методи кластеризації, регресійного аналізу та імітаційного моделювання, що забезпечили прозорість, чіткість та інтерпретованість результатів.

Завдяки запропонованому підходу оцінено вплив стратегічних інновацій, зокрема розвитку відновлюваних джерел енергії, розумних мереж, впровадження систем накопичення та захисту виробництва енергії, на стан економічної безпеки енергетичного сектору. У результаті визначено наявність просторової асиметрії енергетичного розвитку регіонів. Визначено, що області, у яких сконцентрована найбільша кількість виробництв та енергоємної промисловості, мали найбільший вплив зміни тривалості відключень на значення економічних втрат, що безпосередньо загрожує економічній безпеці енергетичного сектору.

У межах розділу розраховано інтегральний показник стану енергетичного сектору та його безпеки. Для нульового кластеру основними рекомендаціями щодо мінімізації наслідків збільшення тривалості відключень електроенергії стала реалізація розподіленої генерації та формування установок зберігання енергії. Для кластеру один – це використання сучасних систем накопичення та інноваційних технологій генерації енергії. Для кластеру два – розробка резервних потужностей та фізичне зміцнення інфраструктури.

У межах розроблених сценаріїв визначено, що за умови виконання реалістичного сценарію втрати енергосистеми України становлять близько 50 млн грн на рік. У песимістичному сценарії цей показник зростає до 70 млн грн. Зрештою, аналіз чутливості чітко показує, що обсяг втрат залежить від коефіцієнта еластичності для кожного регіону. Зростання може становити від 0,56 до 1,69 млрд грн на рік. Власне, інвестиції формують основу, яка забезпечує підвищення економічної безпеки енергетичного сектору в умовах трансформаційних змін в період повномасштабної військової агресії.

ВИСНОВКИ

У результаті виконання магістерської дисертації та здійснених під час підготовки емпіричних досліджень, що базуються на низці теоретичних та методологічних надбань українських науковців, а також практичної частини дисертації, можна зробити наступні висновки:

1. Україна перебуває на етапі трансформаційних змін. Саме тому доцільним та актуальним питанням для розгляду є аналіз економічної безпеки та вплив на неї стратегічних інновацій енергетичного сектору. Поняття інновації полягає у створенні нових розробок або вдосконаленні вже існуючих для підвищення конкурентоспроможності підприємств, галузі чи всієї держави. Згідно з дослідженнями науковців, ключовими напрямками інноваційної діяльності є підвищення технологічної оснащеності та цифровізація електричних мереж, розвиток відновлюваної енергетики, впровадження енергоефективних технологій та модернізація енергетичних ринків. Роль інновацій є ключовою для формування економічної безпеки енергетичного сектору, зокрема в умовах тривалого воєнного стану. Адже економічна безпека є однією з основ національної безпеки, регулює захист інтересів суб'єктів господарювання, забезпечує умови для зростання та розвитку галузей економіки. З погляду енергетичного сектору вона забезпечує доступність енергоресурсів, сприяючи відповідності сучасним екологічним нормам та стійкості енергетичних ринків.

2. Основними чинниками впливу на економічну безпеку є геополітичні, економічні, інфраструктурні, регуляторні, міжнародні та фінансові. Вони формують значення показника економічної безпеки енергетичного сектору, спираючись на поточний стан розвитку ринків, і відображаються в індикаторах економічної безпеки, таких як: кількість встановлених розумних лічильників, обсяг інновацій у секторі, обсяг інвестицій у регіональні енергосистеми тощо. Це важливо для розуміння диференціації регіонів України та подальшого аналізу інвестиційних можливостей у цьому секторі економіки. Серед інших індикаторів є ті, що відображають якість та необхідність ключових інвестицій, їх доступність та поточний рівень оснащеності енергетичного сектору.

3. З метою отримання обґрунтованих засобів оцінювання економічної безпеки сформовано методологічні підходи та інструментарій економічного аналізу інновацій. Для дослідження та кластеризації регіонів за рівнем інноваційної активності та інвестиційними потоками обрано метод К-середніх. Вплив інших факторів на показник економічної безпеки енергетичного сектору досліджувався за допомогою регресійних моделей на основі лінійного моделювання. Також, для аналізу міжрегіональної взаємодії використано індекс Морана.

3. Описова аналітика стратегічних інновацій у концепції забезпечення економічної безпеки виявила основні детермінанти, які дозволили сформулювати показники економічної безпеки з погляду стійкості енергетичної системи, її інвестиційно-інноваційного розвитку, технологічної надійності та доступності. Використовуючи дані, що відображають показники економічної безпеки енергетичного сектору, та аналізуючи інвестиційний, інноваційний, географічний, економічний, соціальний і інфраструктурний потенціал кожної області, зібрано інформацію про 25 регіонів за період з 2016 по 2024 роки. Індикатором, що відображає вплив інновацій на економічну безпеку, є показник системної середньої тривалості перерв у електропостачанні, який змінюється під впливом низки незалежних чинників, зокрема: кількості смарт-лічильників як одного з найбільш репрезентативних показників інноваційної діяльності, обсягу введених інновацій та обсягу інвестицій в енергетичний сектор. Серед інших показників виділено валовий регіональний продукт, кількість атак на енергетичну інфраструктуру, співвідношення фактичних відключень електроенергії до планових.

4. Проведено аналіз стратегічних інновацій, який показав, що завдяки підтримці уряду та фінансових програм банків українського та іноземного капіталу український енергетичний сектор зберігає високий рівень економічної незалежності та безпеки. Використання кластерного аналізу дозволило оцінити потенційну ефективність впровадження інновацій у кожному кластері. Кластер 0 об'єднав більшість західних та північних областей. Кластер 1 представляє місто Київ, а кластер 2 — більшість прифронтових областей. Водночас встановлено, що для всіх кластерів характерна тенденція до зростання кількості інноваційних

проектів та впроваджених розумних лічильників за розглянутий період. Найтісніший взаємозв'язок між показником тривалості перерв у електропостачанні та індикаторами розвитку економічної безпеки енергетичного сектору спостерігається для таких змінних: обсягу інновацій, обсягу інвестицій, співвідношення загальних відключень до планових та кількості атак на енергетичну інфраструктуру.

5. У результаті побудови матриці міжрегіональної взаємодії вдалося визначити потенційні можливості регіонів щодо підтримки перетоків енергії. Однак, як показав індекс Морана, наразі це ускладнено через пошкодження ліній електропередачі, тому подальші дослідження мають детально розглянути ці проблеми.

6. Проведено аналіз впливу стратегічних інновацій на забезпечення економічної безпеки енергетичного сектору України. Запропонована методологія, що враховує очікувані економічні втрати від однієї години простою та інтегральний показник економічної безпеки, дозволила оцінити її стан у кожному регіоні. Найбільші витрати, пов'язані з перебоями в електропостачанні, характерні для міста Києва як найбільш енергоємного в країні. Найменші — для прифронтових областей кластера 2.

7. Спостерігається практично лінійна кореляція між погіршенням стану економічної безпеки енергетичного сектору та економічними втратами. Найбільші економічні втрати зазнали місто Київ та Дніпропетровська область як потужні виробничі центри української економіки. Наступним етапом стала побудова інтегрального індексу економічної безпеки. Встановлено, що всі кластери знаходяться близько до його середнього рівня. Це свідчить про необхідність вжиття заходів щодо його підвищення в енергетичному секторі шляхом впровадження стратегічних інновацій, таких як розвиток альтернативної енергетики, виробництво біогазу та біометану, модернізація металургії та видобувної промисловості, підтримка вітрової енергетики, впровадження інноваційних систем зберігання енергії, а також заходів щодо фізичного захисту генеруючих потужностей для забезпечення стабільності та підвищення рівня економічної безпеки.

8. Аналіз чутливості моделі збільшення частки економічної активності, залежної від електропостачання, істотно підвищує економічні втрати: від 0,56 до 1,69 млрд грн при зміні енергоємності ВРП від 10% до 30%. Це ще раз підкреслює, критичну важливість інвестиції у стратегічні інновації для мінімізації втрат та підвищенні стійкості енергетичної системи України.

9. Відповідно до розроблених сценаріїв розвитку, встановлено, що в межах реалістичного сценарію показник тривалості відключень порівняно з минулим періодом в середньому знижується на 30%, а в межах оптимістичного — до 68% у окремих областях кластера 0. Для кластера 1 зниження може становити 23% за песимістичним сценарієм або 45% за реалістичним порівняно з попереднім роком. Що стосується кластера 2, то середнє зниження за реалістичним сценарієм становить близько 15% відносно минулого року. Водночас прогнозування ускладнене через брак якісних даних щодо прифронтових регіонів. Загалом, індекс тривалості відключень свідчить про покращення стану інноваційної діяльності та безпеки в країні.

10. Використання інноваційних технологій у енергетичному секторі дозволяє не тільки підвищити стійкість системи, але також зменшити втрати та створити передумови для підтримки високого рівня економічної безпеки енергетичного сектору України в період воєнного стану на фоні глобальних трансформаційних змін. У подальшому такі реформаційні кроки дозволять системі ефективніше адаптуватися та відновитися у післявоєнний період.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Портной Є. Вплив цифрової трансформації на інноваційну діяльність підприємств. *Сталий розвиток економіки*. 2025. № 4(51). С. 368–375. URL: <https://doi.org/10.32782/2308-1988/2024-51-52>.
2. *Теорія економічного розвитку: Дослідження прибутків, капіталу, кредиту, відсотка та економічного циклу* / [Й. А. Шумпетер]; пер. з англ. В. Старка. Київ: Видавничий дім «Києво-Могилянська академія», 2011. 242 с.
3. Роджерс Е.М. *Diffusion of Innovations*. 5-те вид. — Нью-Йорк : Free Press, 2003. 551 с.
4. Друкер П. *Як забезпечити успіх у бізнесі: новаторство і підприємництво* : навч. посібник. Київ: Україна, 1994. 319 с.
5. Про інноваційну діяльність: Закон України від 04.07.2002 № 40-IV : станом на 31 берез. 2023 р. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/40-15#Text>.
6. Микитюк П. П., Крисько Ж. Л., Овсянюк-Бердадіна О. Ф., Скочиляс С. М. *Інноваційний розвиток підприємства* : навч. пос.; відп. ред. П. П. Микитюк. Тернопіль; ПП Принтер Інформ; 2015. 224 с. URL : <http://dspace.wunu.edu.ua/handle/316497/684>.
7. OECD/Eurostat. *Oslo Manual 2018: Guidelines for Collecting, Reporting and Using Data on Innovation*, 4th Edition. Paris: OECD Publishing ; Luxembourg: Eurostat, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1787/9789264304604-en>.
8. Тимошенко, Н., & Шабанова, М. Розвиток інноваційної діяльності в умовах цифровізації. *Економіка та суспільство*. 2021. № 29. DOI: <https://doi.org/10.32782/2524-0072/2021-29-30>.
9. Бажал Ю. М. Розвиток інноваційної діяльності у знаннєвому трикутнику «державна – університети – промисловість». *Економіка і прогнозування*. 2015. № 1. С. 76-88. URL : http://nbuv.gov.ua/UJRN/econprog_2015_1_8.
10. Брич Б., Вовчук Д., Ткач М. Імперативи впровадження низьковуглецевих енергетичних інновацій на підприємствах. *Економіка та суспільство*. 2024. № 70. URL: <https://doi.org/10.32782/2524-0072/2024-70-46>.

11. Bondar T., Saher L., Tymoschenko V. Study of influencing factors on the intensity of diffusion of innovative technologies in the energy sector. *Visnik Sums'kogo derzhavnogo universitetu*. 2022. Vol. 2022, № 3. P. 67–72. URL: <https://doi.org/10.21272/1817-9215.2022.3-7>.

12. Стеценко С. П. Економічна безпека: сутність і структура. *Інвестиції: практика та досвід*. 2013. № 24, груд. С. 104–106. URL: http://www.investplan.com.ua/pdf/24_2013/26.pdf.

13. Moldowan A. Economic security of the state as a basic concept of ecosestate: in searching of a universal definition. *Scientific notes of taurida National V.I. Vernadsky University. Series: Economy And Management*. 2021. Vol. 71, № 4. URL: <https://doi.org/10.32838/2523-4803/71-4-2>.

14. Кошельок Г., Пудичева Г. Економічна безпека енергетичних підприємств. *Економіка та суспільство*. 2021. № 28. URL: <https://doi.org/10.32782/2524-0072/2021-28-43>.

15. Adopted the Law of Ukraine “On the Bureau of Economic Security”. *Офіційний портал Верховної Ради України*. URL: <https://www.rada.gov.ua/en/news/News/202310.html>.

16. Указ Президента України №347/2021 – офіційне інтернет-представництво Президента України. *Офіційне інтернет-представництво Президента України*. URL: <https://www.president.gov.ua/documents/3472021-39613>.

17. Pravdiuk A. Features of legislative support economic security of Ukraine. *Information And Law*. 2021. № 2(37). P. 170–182. URL: [https://doi.org/10.37750/2616-6798.2021.2\(37\).238408](https://doi.org/10.37750/2616-6798.2021.2(37).238408).

18. Титаренко О. Зміст регулювання економічної безпеки України на сучасному етапі її розвитку. *Економіка та суспільство*. 2025. № 72. URL: <https://doi.org/10.32782/2524-0072/2025-72-80>.

19. Білоконь М. В., Смаглюк А. А. Економічна безпека України в умовах гібридних загроз. *Український економічний часопис*. 2024. № 5. С. 118–124. URL: <https://doi.org/10.32782/2786-8273/2024-5-21>.

20. Kopytko M., Zaverukha D. Characteristic of the basic component provisions of the economic security of the state. *"Scientific notes of the University"KROK*". 2021. P. 155–160. URL: <https://doi.org/10.31732/2663-2209-2021-63-155-160>.

21. Energy policy and energy security indicators in business. *Economic and social alternatives*. 2022. Vol. 28, № 2. P. 137–143. URL: <https://doi.org/10.37075/isa.2022.2.12>.

22. Babych D. V., Chobitok V. I., Chobitok I. O. Efficiency of innovation and investment development of the country's energy complex in conditions of instability. *The Problems Of Economy*. 2024. Vol. 3, № 61. P. 68–75. URL: <https://doi.org/10.32983/2222-0712-2024-3-68-75>.

23. Заїчко І. В., Хижняк О. В. Особливості інноваційної діяльності в електроенергетиці. *Актуальні питання розвитку економіки: світові та національні аспекти* : Міжнар. наук.-практ. конф., м. Умань, 21 трав. 2025 р. 2025. С. 63–67.

24. Жадько К. С., Литвиненко О. Л. Економічна безпека України: аналіз та підходи до відновлення. *Науковий погляд: економіка та управління*. 2025. Т. 90, № 2. С. 25–32. URL: <https://doi.org/10.32782/2521-666X/2025-90-4>.

25. Faerber L. A., Balta-Ozkan N., Ünal E. Synthesised innovation drivers and barriers in the energy sector. *Energy Policy*. 2026. Vol. 209. P. 115002. URL: <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2025.115002>.

26. Україна в паливному зашморгу: чим загрожує та як позбутися. *Kosatka.Media*. UKR.NET. URL: <https://www.ukr.net/news/details/economics/86389350.html>.

27. В НБУ прогнозують зниження світових цін на енергоносії у найближчі роки. *Kosatka.Media*. UKR.NET. URL: <https://www.ukr.net/news/details/economics/105988433.html>.

28. Біляк Ю. В. Вплив валютного курсу на фінансову безпеку держави. *Agrosvit*. 2024. № 14. С. 62–68. URL: <https://doi.org/10.32702/2306-6792.2024.14.62>.

29. Міністерство енергетики України: Новини. *Міністерство енергетики України*. URL: <https://mev.gov.ua/news>.

30. Національна комісія, що здійснює державне регулювання у сферах енергетики та комунальних послуг. Головна. *Національна комісія, що здійснює державне регулювання у сферах енергетики та комунальних послуг*. URL: <https://www.nerc.gov.ua/pro-nkrekp/mizhnarodne-spivrobitnictvo/energetichne-spivtovaristvo/protokoli-priyednannya-do-energetichnogo-spivtovaristva>.

31. Європейський зелений курс. *Екодія*. URL: https://ecoaction.org.ua/ievropejskyj-zelenyj-kurs.html?gad_source=1&gad_campaignid=15172720496&gbraid=0AAAAACVR_NQV382jyNZIeLH9-jJunWNcB&gclid=Cj0KCQiAi9rJBhCYARIsALyPDtvfuh74K1NtWXN26StPCHW7mq78uHJq0OUZHm5QDr6hMwz-_oMrqr8aAjeIEALw_wcB.

32. Les I. O. The role of the IAEA in establishing international standards for the use of atomic energy (retrospective analysis). *Analytical And Comparative Jurisprudence*. 2023. № 4. P. 551–558. URL: <https://doi.org/10.24144/2788-6018.2023.04.88>.

33. Нароган В. В., Narohan V. V. Монетарна політика держави в системі забезпечення економічної безпеки України: дисертація : thesis. 2020. URL: <http://dspace.lvduvs.edu.ua/handle/1234567890/3526>.

34. Єфименко Т. І. Податкове регулювання: управління змінами в умовах воєнного стану та повоєнного відновлення. *Облік, аналіз, аудит, оподаткування та фінансовий моніторинг в умовах повоєнного відновлення України* : IX Міжнар. наук.-практ. конф., м. Київ. Київ, 2023. С. 11–14. URL: <https://ir.kneu.edu.ua/handle/2010/43773>.

35. Manuilov Y. Cyber security of critical infrastructure during cyber warfare. *Information And Law*. 2023. № 1(44). P. 154–167. URL: [https://doi.org/10.37750/2616-6798.2023.1\(44\).287780](https://doi.org/10.37750/2616-6798.2023.1(44).287780).

36. Орехова А., Клименко М., Хоролець Б. Проблеми та особливості управління альтернативною енергетикою в Україні під час повномасштабної війни. *Економіка та суспільство*. 2024. Вип. 63. URL: <https://doi.org/10.32782/2524-0072/2024-63-23>.

37. Publications. *Міністерство з питань енергетики та захисту довкілля України*. URL: <https://mpe.kmu.gov.ua/publications>.

38. Шевчук О. А., Климович О. Р. Інноваційний розвиток України в умовах трансформаційних змін. *Економічний вісник Донбасу*. 2024. № 3 (77). С. 130–139. URL: [https://doi.org/10.12958/1817-3772-2024-3\(77\)-130-139](https://doi.org/10.12958/1817-3772-2024-3(77)-130-139).

39. Климович О. Р., Бояринова К. О., Кінчев О. І. Ідентифікація регіональних відмінностей енергетичного розвитку України за допомогою методів багатовимірної статистики. *Актуальні проблеми економіки, обліку, управління та права в XXI столітті* : зб. тез доп. Міжнар. науково-практ. конф., м. Черкаси, 11 листоп. 2025 р. 2025. С. 8–12. URL: <https://www.economics.in.ua/2025/11/11.html>.

40. Бояринова К., Климович О., Кінчев О. Аналітичне моделювання енергетичної безпеки України з урахуванням регіональних детермінант інноваційного розвитку. *Економічний аналіз*. 2025. Т. 35, № 3. С. 308–322. URL: <https://doi.org/10.35774/econa2025.03.308>.

41. Abelairas-Etxebarria P., Astorkiza I. From Exploratory Data Analysis to Exploratory Spatial Data Analysis. *Mathematics and Statistics*. 2020. Vol. 8, № 2. P. 82–86. URL: <https://doi.org/10.13189/ms.2020.080202>.

42. Економетрика : конспект лекцій : у 2 ч. / уклад. : С. В. Коломієць. Суми : Сумський державний університет, 2025. Ч. 1. 190 с. URL: <https://essuir.sumdu.edu.ua/handle/123456789/98745>.

43. G. James et al. *An Introduction to Statistical Learning*. New York, NY : Springer New York, 2013. URL: <https://doi.org/10.1007/978-1-4614-7138-7>.

44. Forecasting: *Principles and Practice*. OTexts, 2021. 442 p.

45. Hansen B. Testing for Linearity. *Journal of Economic Surveys*. 1999. Vol. 13, № 5. P. 551–576. URL: <https://doi.org/10.1111/1467-6419.00098>.

46. Urabe C. T., Junior J. G. d. S. F., Takeuchi T. Machine Learning Applications on Integration of Renewable Energy to Power Systems. *IEEEJ Transactions on Power and Energy*. 2022. Vol. 142, № 6. P. 283–286. URL: <https://doi.org/10.1541/ieejpes.142.283>.

47. Ardakani O. M. Robust Learning of Tail Dependence. *Econometrics*. 2025. Vol. 13, № 4. P. 47. URL: <https://doi.org/10.3390/econometrics13040047>.

48. Міністерство енергетики України: Новини. *Міністерство енергетики України*. URL: <https://mev.gov.ua/>.
49. Головна сторінка: Державна служба статистики України. *Державна служба статистики України*. URL: <https://stat.gov.ua/uk>.
50. Головна сторінка. *Оператор ринку*. URL: <https://www.oree.com.ua/>.
51. Головна сторінка. *НЕК «Укренерго»*. URL: <https://ua.energy/>.
52. Ukraine - Countries & Regions - IEA. *IEA*. URL: <https://www.iea.org/countries/ukraine/electricity/>.
53. Головна: Energy Map. *Energy Map*. URL: <https://energy-map.info/uk>.
54. Чернявський М. В. Теплові електростанції як елементи системи регулювання режимів енергосистеми України. *Вісник НАН України*. 2024. № 4. С. 45–57. URL: <https://doi.org/10.15407/visn2024.04.045>.
55. Voloshko A. V., Shevchuk V. V. Voltage failures in electrical networks and determination of their characteristics. *Visnyk of Vinnytsia Politechnical Institute*. 2023. Vol. 170, № 5. P. 12–17. URL: <https://doi.org/10.31649/1997-9266-2023-170-5-12-17>.
56. Міненергетики: 61% обладнання та 4,95% ліній електромереж спрацювало свій ресурс. *Українська Енергетика*. URL: <https://ua-energy.org/uk/posts/minenerhetyky-61-obladnannia-ta-495-linii-elektromerezh-spratsiuvalo-svii-resurs>.
57. Офіційний сайт Держенергоефективності – головного енергоменеджера країни. *Державне агентство з енергоефективності та енергозбереження України*. URL: <https://saee.gov.ua/>.
58. Кубатко О., Ковальов Б., Яременко А., Півень В. Економічна та енергетична безпека України в умовах війни. *Bulletin of Sumy National Agrarian Universit.* 2023. Вип. 4 (96). С. 39–47. URL: <https://snaujournal.com.ua/index.php/journal/article/view/312>.
59. DTEK Group – We transform into a pan-European energy group. URL: <https://dtek.com/en/media-center/news/dtek-and-fluence-energise-the-largest-battery-storage-facility-in-ukraine-with-a-total-capacity-of-200-mw/>.

60. EIB provides €86 million to protect Ukraine's energy infrastructure from Russian attacks. *EU for Ukraine*. URL: <https://eu4ukraine.eu/en/whats-happening-en/news-en/86-million-to-protect-ukraines-energy-infrastructure.html>

61. Кириченко О. С. Сучасні аспекти та технології управління розвитком підприємств. «*Scientific notes of the University «KROK»*. 2022. С. 107–115. URL: <https://doi.org/10.31732/2663-2209-2022-66-107-115>.

62. V. Lagodiienko et al. Alternative energy as a driver of economic modernization of Ukraine. *Ukrainian journal of applied economics and technology*. 2025. Vol. 2025, № 4. P. 197–200. URL: <https://doi.org/10.36887/2415-8453-2025-3-39>.

63. Проходження осінньо-зимових періодів 2022-2024 рр. Стан енергосистеми. *Міжнародний фонд «Відродження»*. URL: <https://www.irf.ua/prohodzhennya-osinno-zymovyh-periodiv-2022-2024-rr-stan-energosityemy/>.

64. Bundesnetzagentur - Press - Electricity supply interruptions in 2024 shorter than in the previous year – Germany's electricity grid one of the most reliable in a European comparison. *Bundesnetzagentur* - *Startseite*. URL: https://www.bundesnetzagentur.de/SharedDocs/Pressemitteilungen/EN/2025/20251009_SAIDI_Strom.html.

65. Суходоля О. М., Харазішвілі Ю. М., Рябцев Г. Л. *Енергетична безпека України: перспективна модель управління ризиками* / ред. О. М. Суходоля. Київ : НІСД, 2023. 152 с. URL: <https://doi.org/10.53679/NISS-book.2023.01>.

66. Бояринова К.О., Степанчук К.С. Економіко-математичне моделювання інвестиційної привабливості альтернативної енергетики України в умовах воєнного стану. *Ефективна економіка*. 2023. № 11. DOI: <https://doi.org/10.32702/2307-2105.2023.11.30> URL: <https://www.nayka.com.ua/index.php/ee/article/view/2489/2525>

ДОДАТКИ

Додаток А

Лістинг коду програми

```
# Аналіз вхідних даних до кластеризації
import matplotlib.pyplot as plt
import seaborn as sns
import numpy as np
from scipy import stats
import pandas as pd

def setup_visualization_style():
    plt.style.use('default')
    sns.set_palette("husl")
    plt.rcParams['figure.figsize'] = (12, 8)
    plt.rcParams['font.size'] = 12
    plt.rcParams['font.family'] = 'DejaVu Sans'

def exploratory_data_analysis(df):
    print(f'Розмірність датафрейму: {df.shape}')
    print(f'Кількість регіонів: {df['region'].nunique()}')
    print(f'Роки: від {df['year'].min()} до {df['year'].max()}')
    print(f'Загальна кількість спостережень: {len(df)}')
    print(df.dtypes)
    missing_data = df.isnull().sum()
    missing_percent = (missing_data / len(df)) * 100
    missing_info = pd.DataFrame({
        'Пропуски': missing_data,
        'Процент': missing_percent
    })
    print(missing_info[missing_info['Пропуски'] > 0])
    numeric_columns = df.select_dtypes(include=[np.number]).columns
    print(df[numeric_columns].describe().round(2))

def plot_data_distributions(df):
    setup_visualization_style()
    main_variables = ['safety_index', 'investment_region', 'attacks', 'grp',
                     'innovations', 'planned_vs_actual_outages', 'smart_meter']
    fig, axes = plt.subplots(3, 3, figsize=(18, 15))
    axes = axes.flatten()
    for i, var in enumerate(main_variables):
        if i < len(axes) and var in df.columns:
            sns.histplot(data=df, x=var, kde=True, ax=axes[i], bins=20)
            axes[i].set_title(f'Розподіл {var}')
            axes[i].set_xlabel(var)
            axes[i].set_ylabel('Частота')
            mean_val = df[var].mean()
            median_val = df[var].median()
            axes[i].axvline(mean_val, color='red', linestyle='--',
                           label=f'Середнє: {mean_val:.2f}')
            axes[i].axvline(median_val, color='green', linestyle='--',
```

```

        label=f'Медіана: {median_val:.2f}')
    axes[i].legend()
for i in range(len(main_variables), len(axes)):
    axes[i].axis('off')
plt.suptitle('Розподіли основних числових змінних',
            fontsize=16, fontweight='bold')
plt.tight_layout()

def plot_temporal_trends(df):
    setup_visualization_style()
    metrics = ['safety_index', 'investment_region', 'attacks', 'grp',
'planned_vs_actual_outages', 'smart_meter', 'innovations']
    fig, axes = plt.subplots(2, 2, figsize=(16, 12))
    axes = axes.flatten()
    for i, metric in enumerate(metrics):
        if i < len(axes):
            yearly_means = df.groupby('year')[metric].mean()
            yearly_std = df.groupby('year')[metric].std()
            axes[i].plot(yearly_means.index, yearly_means.values,
                        marker='o', linewidth=2, label='Середнє')
            axes[i].fill_between(yearly_means.index,
                                yearly_means - yearly_std,
                                yearly_means + yearly_std,
                                alpha=0.3, label='±1 STD')
            if len(yearly_means) > 1:
                z = np.polyfit(yearly_means.index, yearly_means.values, 1)
                p = np.poly1d(z)
                axes[i].plot(yearly_means.index, p(yearly_means.index),
                            "r--", alpha=0.8, label=f'Тренд (нахил: {z[0]:.3f})')
            axes[i].set_xlabel('Рік')
            axes[i].set_ylabel(metric)
            axes[i].set_title(f'Динаміка {metric} по роках')
            axes[i].legend()
            axes[i].grid(True, alpha=0.3)
    plt.tight_layout()

def plot_top_regions_analysis(df, metric='safety_index', top_n=5):
    setup_visualization_style()
    region_means = df.groupby('region')[metric].mean().sort_values(ascending=False)
    top_regions = region_means.head(top_n).index.tolist()
    print(f'Топ-{top_n} регіонів за {metric}:')
    for i, region in enumerate(top_regions, 1):
        mean_val = region_means[region]
        print(f' {i}. {region}: {mean_val:.2f}')
    fig, (ax1, ax2) = plt.subplots(1, 2, figsize=(16, 6))
    top_data = df[df['region'].isin(top_regions)]
    region_year_means = top_data.groupby(['region', 'year'])[metric].mean().reset_index()
    sns.barplot(data=region_year_means, x='region', y=metric, ax=ax1)
    ax1.set_title(f'Середні значення {metric} для топ-{top_n} регіонів')
    ax1.set_xlabel('Регіон')
    ax1.set_ylabel(metric)
    ax1.tick_params(axis='x', rotation=45)

```

```

for region in top_regions:
    region_data = df[df['region'] == region]
    yearly_means = region_data.groupby('year')[metric].mean()
    ax2.plot(yearly_means.index, yearly_means.values,
             marker='o', linewidth=2, label=region)
ax2.set_xlabel('Рік')
ax2.set_ylabel(metric)
ax2.set_title(f'Динаміка {metric} по роках\n(Топ-{top_n} регіонів)')
ax2.legend(bbox_to_anchor=(1.05, 1), loc='upper left')
ax2.grid(True, alpha=0.3)
plt.suptitle(f'Аналіз топ-{top_n} регіонів за {metric.upper()} ',
            fontsize=14, fontweight='bold')
plt.tight_layout()

def plot_correlation_analysis(df):
    setup_visualization_style()
    numeric_vars = ['safety_index', 'investment_region', 'attacks', 'grp',
                    'innovations', 'planned_vs_actual_outages', 'smart_meter']
    corr_matrix = df[numeric_vars].corr()
    plt.figure(figsize=(12, 10))
    mask = np.triu(np.ones_like(corr_matrix, dtype=bool))
    sns.heatmap(corr_matrix, annot=True, cmap="coolwarm", center=0,
                square=True, fmt=".2f", linewidths=0.5, mask=mask,
                cbar_kws={"shrink": .8})
    plt.title('Кореляційна матриця між змінними', pad=20, fontsize=16)
    plt.tight_layout()
    strong_correlations = []
    for i in range(len(corr_matrix.columns)):
        for j in range(i+1, len(corr_matrix.columns)):
            corr_val = corr_matrix.iloc[i, j]
            if abs(corr_val) > 0.5:
                strong_correlations.append(
                    (corr_matrix.columns[i], corr_matrix.columns[j], corr_val)
                )
    if strong_correlations:
        for var1, var2, corr in strong_correlations:
            direction = "позитивна" if corr > 0 else "негативна"
            strength = "дуже сильна" if abs(corr) > 0.8 else "сильна" if abs(corr) > 0.6 else "помірна"
            print(f" {var1} ↔ {var2}: {corr:.3f} ({strength} {direction})")
    else:
        print(" Сильних кореляцій не виявлено")

def plot_geographical_patterns(df):
    setup_visualization_style()
    region_means = df.groupby('region').agg({
        'safety_index': 'mean',
        'investment_region': 'mean',
        'attacks': 'mean',
        'grp': 'mean'
    }).round(2)
    metrics = ['safety_index', 'investment_region', 'attacks', 'grp']
    fig, axes = plt.subplots(2, 2, figsize=(16, 12))

```

```

axes = axes.flatten()
for i, metric in enumerate(metrics):
    if i < len(axes):
        top_regions = region_means.nlargest(10, metric)[metric]
        colors = plt.cm.viridis(np.linspace(0, 1, len(top_regions)))
        bars = axes[i].barh(range(len(top_regions)), top_regions.values, color=colors)
        axes[i].set_yticks(range(len(top_regions)))
        axes[i].set_yticklabels(top_regions.index)
        axes[i].set_xlabel(metric)
        axes[i].set_title(f'Топ-10 регіонів за {metric}')
        for j, (bar, value) in enumerate(zip(bars, top_regions.values)):
            axes[i].text(bar.get_width(), bar.get_y() + bar.get_height()/2,
                          f'{value:.1f}', ha='left', va='center', fontweight='bold')
plt.suptitle('Рейтинг регіонів за основними показниками',
             fontsize=16, fontweight='bold')
plt.tight_layout()
print(f'Загальна кількість регіонів: {len(region_means)}')
print(f'Регіон з найвищим SAIDI: {region_means['safety_index'].idxmax()}
({region_means['safety_index'].max():.2f})')
print(f'Регіон з найнижчим SAIDI: {region_means['safety_index'].idxmin()}
({region_means['safety_index'].min():.2f})')
print(f'Регіон з найбільшими інвестиціями: {region_means['investment_region'].idxmax()}
({region_means['investment_region'].max():.0f})')

def plot_missing_data_analysis(df):
    setup_visualization_style()
    plt.figure(figsize=(12, 8))
    missing_matrix = df.isnull()
    sns.heatmap(missing_matrix, cbar=True, cmap='viridis',
                yticklabels=False, cbar_kws={'label': 'Пропуск'})
    plt.title('Матриця пропущених даних', fontsize=16, fontweight='bold')
    plt.xlabel('Змінні')
    plt.ylabel('Спостереження')
    plt.tight_layout()
    missing_stats = df.isnull().sum().sort_values(ascending=False)
    missing_stats = missing_stats[missing_stats > 0]
    if len(missing_stats) > 0:
        print("Статистика пропусків:")
        for var, count in missing_stats.items():
            percentage = (count / len(df)) * 100
            print(f' {var}: {count} пропусків ({percentage:.1f}%)')

def plot_outlier_analysis(df):
    setup_visualization_style()
    numeric_vars = ['safety_index', 'investment_region', 'attacks', 'grp',
                    'innovations', 'planned_vs_actual_outages', 'smart_meter']
    fig, axes = plt.subplots(2, 4, figsize=(20, 10))
    axes = axes.flatten()
    for i, var in enumerate(numeric_vars):
        if i < len(axes):
            sns.boxplot(data=df, y=var, ax=axes[i])
            axes[i].set_title(f'Розподіл {var}')

```

```

        axes[i].set_ylabel(var)
    for i in range(len(numeric_vars), len(axes)):
        axes[i].axis('off')
    plt.suptitle('Аналіз викидів в числових змінних',
                 fontsize=16, fontweight='bold')
    plt.tight_layout()
    print("Статистика викидів (метод IQR):")
    for var in numeric_vars:
        Q1 = df[var].quantile(0.25)
        Q3 = df[var].quantile(0.75)
        IQR = Q3 - Q1
        lower_bound = Q1 - 1.5 * IQR
        upper_bound = Q3 + 1.5 * IQR
        outliers = df[(df[var] < lower_bound) | (df[var] > upper_bound)]
        outlier_percentage = (len(outliers) / len(df)) * 100
        print(f' {var}: {len(outliers)} викидів ({outlier_percentage:.1f}%)')

def plot_data_structure_analysis(df):
    setup_visualization_style()
    fig, ((ax1, ax2), (ax3, ax4)) = plt.subplots(2, 2, figsize=(16, 12))
    yearly_counts = df.groupby('year').size()
    yearly_counts.plot(kind='bar', ax=ax1, color='skyblue')
    ax1.set_title('Кількість спостережень по роках')
    ax1.set_ylabel('Кількість спостережень')
    ax1.tick_params(axis='x', rotation=45)
    regions_per_year = df.groupby('year')['region'].nunique()
    regions_per_year.plot(kind='bar', ax=ax2, color='lightgreen')
    ax2.set_title('Кількість регіонів по роках')
    ax2.set_ylabel('Кількість регіонів')
    ax2.tick_params(axis='x', rotation=45)
    year_region_matrix = df.pivot_table(index='region', columns='year',
                                         values='safety_index', aggfunc='count')
    sns.heatmap(year_region_matrix.notnull(), cbar=False, cmap=['red', 'green'],
                ax=ax3, cbar_kws={'label': 'Наявність даних'})
    ax3.set_title('Наявність даних по регіонах та роках\n(зелений - дані є, червоний - відсутні)')
    ax3.tick_params(axis='x', rotation=45)
    ax3.tick_params(axis='y', rotation=0)
    regions = df['region'].nunique()
    years = df['year'].nunique()
    total_obs = len(df)
    max_possible = regions * years
    completeness = (total_obs / max_possible) * 100
    labels = ['Наявні спостереження', 'Відсутні спостереження']
    sizes = [total_obs, max_possible - total_obs]
    colors = ['lightgreen', 'lightcoral']
    ax4.pie(sizes, labels=labels, colors=colors, autopct='%1.1f%%', startangle=90)
    ax4.set_title(f'Заповненість панелі даних\n({completeness:.1f}% заповнено)')
    plt.suptitle('Аналіз структури панельних даних',
                 fontsize=16, fontweight='bold')
    plt.tight_layout()
    print(f'Статистика структури даних:')
    print(f' Унікальних регіонів: {regions}')

```

```

print(f' Років: {years}')
print(f' Загальна кількість спостережень: {total_obs}')
print(f' Максимально можливих спостережень: {max_possible}')
print(f' Заповненість панелі: {completeness:.1f}%)
if completeness > 95:
    print(" Панель майже повністю заповнена")
elif completeness > 80:
    print(" Панель добре заповнена")
elif completeness > 60:
    print(" Панель помірно заповнена")
else:
    print(" Панель слабо заповнена")

try:
    if 'cluster' in df.columns:
        df_analysis = df.drop('cluster', axis=1).copy()
        print("Видалено стовпець 'cluster' для аналізу вхідних даних")
    else:
        df_analysis = df.copy()
    exploratory_data_analysis(df_analysis)
    plot_data_distributions(df_analysis)
    plot_temporal_trends(df_analysis)
    plot_top_regions_analysis(df_analysis, metric='safety_index', top_n=5)
    plot_top_regions_analysis(df_analysis, metric='investment_region', top_n=5)
    plot_top_regions_analysis(df_analysis, metric='attacks', top_n=5)
    plot_correlation_analysis(df_analysis)
    plot_geographical_patterns(df_analysis)
    plot_missing_data_analysis(df_analysis)
    plot_outlier_analysis(df_analysis)
    plot_data_structure_analysis(df_analysis)
    print("Аналіз вхідних даних успішно завершено!")
    print(f'Фінальний звіт про вхідні дані:")
    print(f'• Розмірність: {df_analysis.shape}')
    print(f'• Період: {df_analysis['year'].min()} - {df_analysis['year'].max()}")
    print(f'• Регіони: {df_analysis['region'].nunique()}")
    print(f'• Чисельні змінні: {len(df_analysis.select_dtypes(include=[np.number]).columns)}")
    print(f'• Категорійні змінні: {len(df_analysis.select_dtypes(include=['object']).columns)}")
    numeric_vars = ['safety_index', 'investment_region', 'attacks', 'grp']
    missing_before_clustering = df_analysis[numeric_vars].isnull().sum().sum()
    if missing_before_clustering == 0:
        print(" Всі ключові змінні заповнені - дані готові до кластеризації")
    else:
        print(f' Знайдено {missing_before_clustering} пропусків - необхідний додатковий
препроцесинг")
except Exception as e:
    print(f'Помилка при аналізі даних: {e}')
    import traceback
    traceback.print_exc()
# Препроцесинг з заповненням пропусків
df_processed = df.copy()
numeric_vars = [
    'safety_index', 'investment_region', 'attacks', 'grp',

```

```

    'innovations', 'planned_vs_actual_outages', 'smart_meter'
]

def fill_missing_with_region_mean(df, columns):
    df_filled = df.copy()
    for column in columns:
        df_filled[column] = df_filled.groupby('region')[column].transform(
            lambda x: x.fillna(x.mean()) if x.notna().any() else x
        )
    df_filled[column] = df_filled[column].fillna(df_filled[column].mean())
    return df_filled

df_processed = fill_missing_with_region_mean(df_processed, numeric_vars)
df = df_processed.copy()
print(f'Розмірність датафрейму: {df.shape}')

# Кластеризація регіонів
from sklearn.preprocessing import StandardScaler
from sklearn.cluster import KMeans
from sklearn.metrics import silhouette_score

cluster_vars = ['safety_index', 'investment_region', 'attacks', 'grp']
region_means = df.groupby('region')[cluster_vars].mean()
scaler = StandardScaler()
X_scaled = scaler.fit_transform(region_means)

wcss = []
sil_scores = []
k_range = range(2, 8)

for k in k_range:
    kmeans = KMeans(n_clusters=k, random_state=42, n_init=10)
    kmeans.fit(X_scaled)
    wcss.append(kmeans.inertia_)
    sil_scores.append(silhouette_score(X_scaled, kmeans.labels_))

fig, (ax1, ax2) = plt.subplots(1, 2, figsize=(15, 5))
ax1.plot(k_range, wcss, 'bo-')
ax1.set_xlabel('Кількість кластерів')
ax1.set_ylabel('WCSS')
ax1.set_title('Метод ліктя для визначення оптимального K')
ax2.plot(k_range, sil_scores, 'ro-')
ax2.set_xlabel('Кількість кластерів')
ax2.set_ylabel('Silhouette Score')
ax2.set_title('Silhouette Score для різних K')
plt.tight_layout()
plt.show()

optimal_k = 3
print(f'Оптимальна кількість кластерів: {optimal_k}')

kmeans_final = KMeans(n_clusters=optimal_k, random_state=42, n_init=10)

```

```

cluster_labels = kmeans_final.fit_predict(X_scaled)
region_means['cluster'] = cluster_labels
df_with_clusters = df.merge(region_means[['cluster']], left_on='region', right_index=True)

from sklearn.decomposition import PCA
pca = PCA(n_components=2)
X_pca = pca.fit_transform(X_scaled)
plt.figure(figsize=(12, 8))
scatter = plt.scatter(X_pca[:, 0], X_pca[:, 1], c=cluster_labels, cmap='viridis')
plt.colorbar(scatter)
plt.xlabel('Перша головна компонента')
plt.ylabel('Друга головна компонента')
plt.title('Кластеризація регіонів України')
for i, region in enumerate(region_means.index):
    plt.annotate(region, (X_pca[i, 0], X_pca[i, 1]), fontsize=8, alpha=0.7)
plt.tight_layout()
plt.show()

print("Області у кожному кластері:")
for cluster_id in sorted(region_means['cluster'].unique()):
    regions_in_cluster = region_means[region_means['cluster'] == cluster_id].index.tolist()
    print(f'Кластер {cluster_id}:')
    for region in regions_in_cluster:
        print(f' - {region}')

df = df_with_clusters.copy()

# Підготовка панельних даних для кластерів
panel_datasets = {}
unique_clusters = sorted(df['cluster'].unique())
cluster_summary = df.groupby('cluster').agg({
    'region': ['count', 'unique'],
    'safety_index': 'mean',
    'attacks': 'mean'
}).round(2)
print("Загальна інформація по кластерах:")
print(cluster_summary)

for cluster_id in unique_clusters:
    cluster_data = df[df['cluster'] == cluster_id].copy()
    cluster_regions = cluster_data['region'].unique()
    print(f'Регіони у кластері {cluster_id}: {', '.join(cluster_regions)}')
    print(f'Всього регіонів: {len(cluster_regions)}')
    cluster_panel = cluster_data.set_index(['region', 'year'])
    n_regions = len(cluster_panel.index.get_level_values(0).unique())
    n_years = len(cluster_panel.index.get_level_values(1).unique())
    total_obs = len(cluster_panel)
    regions_per_year = cluster_panel.groupby('year').size()
    years_per_region = cluster_panel.groupby('region').size()
    if regions_per_year.min() == regions_per_year.max() and years_per_region.min() ==
years_per_region.max():
        panel_type = "balanced"

```

```

else:
    panel_type = "unbalanced"
    print(f"Розмірність панелі: {cluster_panel.shape}")
    print(f"Унікальних регіонів: {n_regions}, років: {n_years}")
    print(f"Тип панелі: {panel_type}")
    print(f"Період: {cluster_panel.index.get_level_values(1).min()}–
{cluster_panel.index.get_level_values(1).max()}")
    region_stats = cluster_data.groupby('region').agg({
        'safety_index': ['mean', 'std'],
        'attacks': 'mean',
        'year': 'count'
    }).round(2)
    print(f"Коротка статистика по регіонах кластеру {cluster_id}:")
    print(region_stats)
    panel_datasets[cluster_id] = {
        'data': cluster_panel,
        'metadata': {
            'n_regions': n_regions,
            'n_years': n_years,
            'total_obs': total_obs,
            'panel_type': panel_type,
            'regions_list': cluster_regions.tolist(),
            'years_range': (
                cluster_panel.index.get_level_values(1).min(),
                cluster_panel.index.get_level_values(1).max()
            )
        }
    }
}
print("Підготовка панельних даних завершена.")

# Кореляційний аналіз для кожного кластера
print("Кореляційний аналіз для кожного кластера")
corr_vars = ['safety_index', 'investment_region', 'attacks', 'grp',
            'innovations', 'planned_vs_actual_outages', 'smart_meter']

if 'cluster' not in df.columns:
    raise ValueError("Стовпець 'cluster' відсутній у датафреймі")

unique_clusters = sorted(df['cluster'].unique())

for cluster_id in unique_clusters:
    print(f"Кластер {cluster_id}")
    cluster_data = df[df['cluster'] == cluster_id]
    corr_matrix = cluster_data[corr_vars].corr()
    plt.figure(figsize=(12, 10))
    mask = np.triu(np.ones_like(corr_matrix, dtype=bool))
    sns.heatmap(corr_matrix, annot=True, cmap="coolwarm", center=0,
                square=True, fmt=".2f", linewidths=0.5, mask=mask,
                cbar_kws={"shrink": .8})
    plt.title(f"Кореляційна матриця змінних (кластер {cluster_id})", pad=20, fontsize=14)
    plt.tight_layout()
    plt.show()

```

```

print(f'Кореляції з safety_index для кластера {cluster_id}:')
safety_corrs = corr_matrix['safety_index'].sort_values(ascending=False)
for var, corr in safety_corrs.items():
    print(f'{var:30}: {corr:6.3f}')

# Аналіз впливу матриці перетоків енергії на SAIDI за кластерами
def create_corrected_energy_flow_matrix(df):
    print("Створення виправленої матриці потоків енергії")
    regions = sorted(df['region'].unique())
    n_regions = len(regions)
    region_to_cluster = df.groupby('region')['cluster'].first().to_dict()
    cluster_regions = {}
    for region, cluster in region_to_cluster.items():
        if cluster not in cluster_regions:
            cluster_regions[cluster] = []
        cluster_regions[cluster].append(region)
    print("Розподіл регіонів по кластерах:")
    for cluster, regs in cluster_regions.items():
        print(f'Кластер {cluster}: {len(regs)} регіонів')
    energy_flows = np.array([
        [ 46818.4, 1760.7, 0.0],
        [ 0.0, 2914.7, 0.0],
        [ 0.0, 17918.8, 33156.3]
    ])
    print("Матриця потоків енергії між кластерами (GWh/рік):")
    print(energy_flows)
    print("Коректний аналіз енергетичного балансу кластерів:")
    cluster_generation = energy_flows.sum(axis=1)
    cluster_consumption = energy_flows.sum(axis=0)
    for i in range(3):
        generation = cluster_generation[i]
        consumption = cluster_consumption[i]
        net_balance = generation - consumption
        if net_balance > 0:
            status = f'Нетто-експортер (+{net_balance:.1f} GWh)'
            impact = "покращує надійність"
        elif net_balance < 0:
            status = f'Нетто-імпортер ({net_balance:.1f} GWh)'
            impact = "погіршує надійність"
        else:
            status = "Збалансований"
            impact = "нейтральний вплив"
        print(f'Кластер {i}: {status} - {impact}')
        print(f'Генерація: {generation:.1f} GWh, Споживання: {consumption:.1f} GWh')
    net_balances = cluster_generation - cluster_consumption
    max_balance = np.max(np.abs(net_balances))
    balance_weights = net_balances / max_balance
    print(f'Чисті баланси кластерів: {net_balances}')
    print(f'Ваги впливу на основі балансів: {balance_weights}')
    W_region = np.zeros((n_regions, n_regions))
    region_to_idx = {region: idx for idx, region in enumerate(regions)}
    for i, region_i in enumerate(regions):

```

```

cluster_i = region_to_cluster[region_i]
for j, region_j in enumerate(regions):
    if i != j:
        W_region[i, j] = max(0, balance_weights[cluster_i])
row_sums = W_region.sum(axis=1)
row_sums[row_sums == 0] = 1
W_region_normalized = W_region / row_sums[:, np.newaxis]
print(f'Розмірність матриці ваг: {W_region_normalized.shape}')
print(f'Діапазон значень ваг: {W_region_normalized.min():.3f} - {W_region_normalized.max():.3f}')
return W_region_normalized, energy_flows, cluster_regions, net_balances

def calculate_energy_flow_lag_saidi(df, weight_matrix):
    print("Розрахунок просторового лагу SAIDI")
    if 'year' in df.columns:
        recent_data = df.groupby('region').apply(
            lambda x: x.nlargest(1, 'year')
        ).reset_index(drop=True)
    else:
        recent_data = df.groupby('region').last().reset_index()
    regions = sorted(df['region'].unique())
    region_to_idx = {region: idx for idx, region in enumerate(regions)}
    spatial_lag_saidi = np.zeros(len(recent_data))
    for i, (idx, row) in enumerate(recent_data.iterrows()):
        region = row['region']
        region_idx = region_to_idx.get(region, -1)
        if region_idx >= 0:
            weighted_sum = 0
            total_weight = 0
            for j, neighbor_region in enumerate(regions):
                if j != region_idx and weight_matrix[region_idx, j] > 0:
                    neighbor_row = recent_data[recent_data['region'] == neighbor_region]
                    if not neighbor_row.empty and 'safety_index' in neighbor_row.columns:
                        neighbor_saidi = neighbor_row['safety_index'].values[0]
                        if not np.isnan(neighbor_saidi):
                            weight = weight_matrix[region_idx, j]
                            weighted_sum += neighbor_saidi * weight
                            total_weight += weight
            if total_weight > 0:
                spatial_lag_saidi[i] = weighted_sum / total_weight
    recent_data['spatial_lag_saidi'] = spatial_lag_saidi
    recent_data['original_saidi'] = recent_data['safety_index']
    print(f'Розраховано просторовий лаг SAIDI для {len(recent_data)} регіонів')
    print(f'Діапазон просторового лагу: {spatial_lag_saidi.min():.2f} - {spatial_lag_saidi.max():.2f}')
    return recent_data

def analyze_energy_flow_impact(spatial_data, cluster_regions, net_balances):
    print("Аналіз впливу перетоків енергії на SAIDI")
    results = {}
    for cluster_id, regions in cluster_regions.items():
        print(f'Кластер {cluster_id}')
        cluster_data = spatial_data[spatial_data['region'].isin(regions)]

```

```

if len(cluster_data) == 0:
    print("Немає даних для аналізу")
    continue
original_saidi = cluster_data['original_saidi'].mean()
spatial_lag_saidi = cluster_data['spatial_lag_saidi'].mean()
energy_balance = net_balances[cluster_id]
if energy_balance > 0:
    expected_impact = "покращення надійності"
    impact_direction = -1
elif energy_balance < 0:
    expected_impact = "погіршення надійності"
    impact_direction = 1
else:
    expected_impact = "нейтральний вплив"
    impact_direction = 0
if original_saidi > 0:
    effective_impact = (spatial_lag_saidi - original_saidi) / original_saidi
else:
    effective_impact = 0
if len(cluster_data) > 1:
    t_stat, p_value = stats.ttest_rel(cluster_data['original_saidi'],
                                     cluster_data['spatial_lag_saidi'])
else:
    t_stat, p_value = np.nan, np.nan
results[cluster_id] = {
    'original_saidi': original_saidi,
    'spatial_lag_saidi': spatial_lag_saidi,
    'effective_impact': effective_impact,
    'energy_balance': energy_balance,
    'expected_impact': expected_impact,
    'impact_direction': impact_direction,
    't_statistic': t_stat,
    'p_value': p_value,
    'n_regions': len(cluster_data),
    'regions': regions
}
print(f'Регіони: {len(regions)}')
print(f'Енергетичний баланс: {energy_balance:.1f} GWh")
print(f'Очікуваний вплив: {expected_impact}")
print(f'Середній SAIDI: {original_saidi:.2f}")
print(f'Середній просторовий лаг SAIDI: {spatial_lag_saidi:.2f}")
print(f'Ефективний вплив: {effective_impact:.3f}")
if not np.isnan(t_stat):
    print(f't-статистика: {t_stat:.3f}, p-value: {p_value:.3f}")
if not np.isnan(p_value) and p_value < 0.05:
    if abs(effective_impact) > 0.1:
        if impact_direction * effective_impact > 0:
            print("Вплив перетоків енергії статистично значущий та відповідає очікуванням")
        else:
            print("Вплив значущий, але протилежний очікуваному")
    else:
        print("Вплив статистично значущий, але незначний за величиною")

```

```

    else:
        print("Вплив перетоків енергії незначущий")
    return results

print("Запуск виправленого аналізу впливу перетоків енергії...")

try:
    weight_matrix, energy_flows, cluster_regions, net_balances =
create_corrected_energy_flow_matrix(df)
    spatial_data = calculate_energy_flow_lag_saidi(df, weight_matrix)
    impact_results = analyze_energy_flow_impact(spatial_data, cluster_regions, net_balances)
    print("Виправлений аналіз впливу перетоків енергії успішно завершено!")
except Exception as e:
    print(f"Критична помилка: {e}")
    import traceback
    traceback.print_exc()

# Додавання просторових лагів до регресійних моделей
from statsmodels.stats.outliers_influence import variance_inflation_factor
import statsmodels.api as sm

def calculate_vif(X):
    vif_data = pd.DataFrame()
    vif_data["Variable"] = X.columns
    vif_data["VIF"] = [variance_inflation_factor(X.values, i) for i in range(len(X.columns))]
    return vif_data

def remove_high_vif_variables(X, threshold=10):
    X_temp = X.copy()
    removed_vars = []
    while True:
        vif_data = calculate_vif(X_temp)
        max_vif = vif_data["VIF"].max()
        max_vif_var = vif_data.loc[vif_data["VIF"].idxmax(), 'Variable']
        if max_vif > threshold and len(X_temp.columns) > 2:
            print(f"Видаляємо змінну {max_vif_var} з VIF = {max_vif:.2f}")
            X_temp = X_temp.drop(columns=[max_vif_var])
            removed_vars.append(max_vif_var)
        else:
            break
    return X_temp, removed_vars

def build_final_cluster_models_with_spatial_lag(panel_datasets, spatial_weight_matrix):
    final_models = {}
    independent_vars = ['investment_region', 'attacks', 'planned_vs_actual_outages', 'smart_meter', 'grp',
'innovations']
    all_regions = sorted(list(set([region for cluster_info in panel_datasets.values()
                                for region in cluster_info['metadata']['regions_list']])))
    region_to_idx = {region: idx for idx, region in enumerate(all_regions)}

    for cluster_id, cluster_info in panel_datasets.items():
        print(f"Кластер {cluster_id} - фінальний аналіз з просторовим лагом")

```

```

cluster_data = cluster_info['data'].reset_index()
metadata = cluster_info['metadata']
print(f'Регіони: {metadata['n_regions']}, Спостереження: {metadata['total_obs']}")
clean_data = cluster_data.dropna(subset=['safety_index']).copy()
for var in independent_vars + ['safety_index']:
    if var in clean_data.columns:
        clean_data[var] = clean_data[var].replace([np.inf, -np.inf], np.nan)
        clean_data[var] = clean_data[var].fillna(clean_data[var].mean())
clean_data['spatial_lag_safety'] = 0.0
for region in metadata['regions_list']:
    region_idx = region_to_idx.get(region)
    if region_idx is not None:
        region_data = clean_data[clean_data['region'] == region]
        for idx, row in region_data.iterrows():
            year = row['year']
            spatial_lag_value = 0
            neighbor_count = 0
            for neighbor_region in all_regions:
                neighbor_idx = region_to_idx.get(neighbor_region)
                if neighbor_idx is not None and region_idx != neighbor_idx:
                    weight = spatial_weight_matrix[region_idx, neighbor_idx]
                    if weight > 0:
                        neighbor_data = clean_data[
                            (clean_data['region'] == neighbor_region) &
                            (clean_data['year'] == year)
                        ]
                        if not neighbor_data.empty and 'safety_index' in neighbor_data.columns:
                            neighbor_safety = neighbor_data['safety_index'].values[0]
                            if not np.isnan(neighbor_safety):
                                spatial_lag_value += weight * neighbor_safety
                                neighbor_count += 1
            if neighbor_count > 0:
                clean_data.loc[idx, 'spatial_lag_safety'] = spatial_lag_value / neighbor_count
print(f'Дані після очищення: {len(clean_data)} спостережень")
print(f'Додано просторові лаги для {len(metadata['regions_list'])} регіонів")
if len(clean_data) < 6:
    print("Замало даних для аналізу")
    continue
X = clean_data[independent_vars]
y = clean_data['safety_index']
vars_to_try = [var for var in independent_vars if var != 'grp']
print("Автоматично видалено 'grp' (завжди високий VIF)")
low_variance_vars = []
for var in vars_to_try:
    if var in X.columns and X[var].std() < 0.001:
        low_variance_vars.append(var)
if low_variance_vars:
    vars_to_try = [var for var in vars_to_try if var not in low_variance_vars]
    print(f'Видалено змінні з низькою дисперсією: {', '.join(low_variance_vars)}")
X_filtered = X[vars_to_try]
X_clean, removed_vars = remove_high_vif_variables(X_filtered, threshold=10)
if len(X_clean.columns) >= 2:

```

```

vars_to_keep = X_clean.columns.tolist()
print(f'Обрано змінні після очищення VIF: {', '.join(vars_to_keep)}")
if removed_vars:
    print(f'Видалені змінні через високий VIF: {', '.join(removed_vars)}")
else:
    print("Не вдалося знайти стабільну комбінацію навіть після очищення VIF")
    continue
try:
    X_final_data = clean_data[vars_to_keep].copy()
    y_final_data = clean_data['safety_index'].copy()
    X_final = sm.add_constant(X_final_data)
    final_model = sm.OLS(y_final_data, X_final).fit()
except Exception as e:
    print(f'Помилка при побудові моделі: {e}')
    continue
print(f'Оптимізована статистика моделі для кластеру {cluster_id}:")
print(f'R-квадрат: {final_model.rsquared:.4f}")
print(f'Скоригований R-квадрат: {final_model.rsquared_adj:.4f}")
print(f'F-статистика: {final_model.fvalue:.4f}")
print(f'P-значення F-статистики: {final_model.f_pvalue:.4f}")
print(final_model.summary())
print("Детальна статистика коефіцієнтів:")
for var in final_model.params.index:
    if var in final_model.pvalues:
        pval = final_model.pvalues[var]
        coef = final_model.params[var]
        std_err = final_model.bse[var] if hasattr(final_model, 'bse') else np.nan
        significance = "****" if pval < 0.01 else "***" if pval < 0.05 else "*" if pval < 0.1 else ""
        print(f" {var}: {coef:.4f} (std.err: {std_err:.4f}) {significance} p={pval:.4f}")
significant_vars = []
for var in final_model.params.index:
    if var != 'const' and var in final_model.pvalues and final_model.pvalues[var] < 0.1:
        significance_level = "****" if final_model.pvalues[var] < 0.01 else "***" if
final_model.pvalues[var] < 0.05 else "*"
        significant_vars.append(f"{var} {significance_level} (p={final_model.pvalues[var]:.4f})")
print(f'Значущі змінні: {', '.join(significant_vars) if significant_vars else 'Немає'}")
if final_model.rsquared_adj > 0.7:
    quality = "Висока"
elif final_model.rsquared_adj > 0.5:
    quality = "Задовільна"
elif final_model.rsquared_adj > 0.3:
    quality = "Низька"
else:
    quality = "Дуже низька"
print(f'Якість моделі: {quality}")
equation_parts = [f' {final_model.params['const']:.4f}"]
for var in vars_to_keep:
    coef = final_model.params[var]
    sign = "+" if coef > 0 else "-"
    abs_coef = abs(coef)
    if abs_coef < 0.001:
        coef_str = f"{abs_coef:.2e}"

```

```

elif abs_coef > 1000:
    coef_str = f"{abs_coef:.1f}"
else:
    coef_str = f"{abs_coef:.4f}"
equation_parts.append(f"{sign}{coef_str}×{var}")
equation = "safety_index = " + "".join(equation_parts)
final_models[cluster_id] = {
    'model': final_model,
    'equation': equation,
    'significant_vars': [var.split(' ')[0] for var in significant_vars],
    'rsquared': final_model.rsquared,
    'rsquared_adj': final_model.rsquared_adj,
    'vars_used': vars_to_keep,
    'quality': quality,
    'metadata': metadata,
    'clean_data_size': len(clean_data)
}
return final_models

print("Використання матриці ваг з аналізу перетоків енергії")
if 'weight_matrix' in globals():
    spatial_weight_matrix = weight_matrix
    print(f"Використовуємо існуючу матрицю ваг розмірністю: {spatial_weight_matrix.shape}")
else:
    print("Матриця ваг не знайдена, створюємо нову...")
    regions = sorted(df['region'].unique())
    n_regions = len(regions)
    region_to_cluster = df.groupby('region')['cluster'].first().to_dict()
    cluster_links = np.array([
        [ 46818.4, 1760.7, 0.0],
        [ 0.0, 2914.7, 0.0],
        [ 0.0, 17918.8, 33156.3]
    ])
    row_sums = cluster_links.sum(axis=1)
    row_sums[row_sums == 0] = 1
    W_cluster = cluster_links / row_sums[:, np.newaxis]
    spatial_weight_matrix = np.zeros((n_regions, n_regions))
    region_to_idx = {region: idx for idx, region in enumerate(regions)}
    for i, region_i in enumerate(regions):
        cluster_i = region_to_cluster[region_i]
        for j, region_j in enumerate(regions):
            if i != j:
                cluster_j = region_to_cluster[region_j]
                spatial_weight_matrix[i, j] = W_cluster[cluster_i, cluster_j]
    row_sums_region = spatial_weight_matrix.sum(axis=1)
    row_sums_region[row_sums_region == 0] = 1
    spatial_weight_matrix = spatial_weight_matrix / row_sums_region[:, np.newaxis]
    print(f"Створено нову матрицю ваг розмірністю: {spatial_weight_matrix.shape}")

final_models_with_spatial = build_final_cluster_models_with_spatial_lag(panel_datasets,
spatial_weight_matrix)

```

```

print("Фінальні результати регресійних моделей з просторовими лагами")
for cluster_id, model_info in final_models_with_spatial.items():
    print(f'Кластер {cluster_id}')
    print(f'Рівняння: {model_info['equation']}')
    print(f'Якість: {model_info['quality']} (R2 = {model_info['rsquared']:.3f}, adj R2 = {model_info['rsquared_adj']:.3f})')
    print(f'Значущі змінні: {' '.join(model_info['significant_vars']) if model_info['significant_vars'] else 'Немає'}")
    print(f'Використані змінні: {' '.join(model_info['vars_used'])}')
    print(f'Дані: {model_info['metadata']['n_regions']} регіонів, {model_info['clean_data_size']} спостережень")

```

Візуалізація результатів регресії та діагностичних тестів

```

def visualize_regression_coefficients(final_models):
    print("Візуалізація коефіцієнтів регресії")
    setup_visualization_style()
    all_coefficients = []
    for cluster_id, model_info in final_models.items():
        model = model_info['model']
        coefficients = model.params.drop('const', errors='ignore')
        pvalues = model.pvalues.drop('const', errors='ignore')
        for var in coefficients.index:
            all_coefficients.append({
                'Cluster': f'Cluster {cluster_id}',
                'Variable': var,
                'Coefficient': coefficients[var],
                'PValue': pvalues[var],
                'Significant': pvalues[var] < 0.1
            })
    if not all_coefficients:
        print("Немає даних для візуалізації")
        return
    coef_df = pd.DataFrame(all_coefficients)
    fig, (ax1, ax2) = plt.subplots(2, 1, figsize=(14, 12))
    sns.barplot(data=coef_df, x='Variable', y='Coefficient', hue='Cluster', ax=ax1)
    ax1.set_title('Коефіцієнти регресії по кластерам', fontsize=16, fontweight='bold')
    ax1.set_xlabel('Змінні')
    ax1.set_ylabel('Значення коефіцієнта')
    ax1.tick_params(axis='x', rotation=45)
    ax1.legend(title='Кластер')
    ax1.grid(True, alpha=0.3)
    significant_coef = coef_df[coef_df['Significant'] == True]
    if not significant_coef.empty:
        sns.barplot(data=significant_coef, x='Variable', y='Coefficient', hue='Cluster', ax=ax2)
        ax2.set_title('Значущі коефіцієнти регресії (p < 0.1)', fontsize=16, fontweight='bold')
        ax2.set_xlabel('Змінні')
        ax2.set_ylabel('Значення коефіцієнта')
        ax2.tick_params(axis='x', rotation=45)
        ax2.legend(title='Кластер')
        ax2.grid(True, alpha=0.3)
    else:
        ax2.text(0.5, 0.5, 'Немає значущих коефіцієнтів (p < 0.1)',

```

```

        ha='center', va='center', transform=ax2.transAxes, fontsize=14)
    ax2.set_title('Значущі коефіцієнти регресії (p < 0.1)', fontsize=16, fontweight='bold')
    plt.tight_layout()
    plt.savefig('regression_coefficients.png', dpi=300, bbox_inches='tight')
    plt.show()
    print("Таблиця коефіцієнтів регресії:")
    coef_table = coef_df.pivot_table(index='Variable', columns='Cluster',
                                     values=['Coefficient', 'PValue'], aggfunc='first')
    print(coef_table.round(4))

def visualize_model_quality(final_models):
    print("Візуалізація якості моделей")
    setup_visualization_style()
    quality_data = []
    for cluster_id, model_info in final_models.items():
        quality_data.append({
            'Cluster': f'Cluster {cluster_id}',
            'R²': model_info['rsquared'],
            'Adj R²': model_info['rsquared_adj'],
            'Quality': model_info['quality'],
            'Observations': model_info['clean_data_size'],
            'Regions': model_info['metadata']['n_regions']
        })
    quality_df = pd.DataFrame(quality_data)
    fig, (ax1, ax2, ax3) = plt.subplots(1, 3, figsize=(18, 6))
    x = range(len(quality_df))
    width = 0.35
    ax1.bar([i - width/2 for i in x], quality_df['R²'], width, label='R²', alpha=0.7)
    ax1.bar([i + width/2 for i in x], quality_df['Adj R²'], width, label='Adj R²', alpha=0.7)
    ax1.set_xlabel('Кластери')
    ax1.set_ylabel('R-квадрат')
    ax1.set_title('Якість моделей по кластерах', fontweight='bold')
    ax1.set_xticks(x)
    ax1.set_xticklabels(quality_df['Cluster'])
    ax1.legend()
    ax1.grid(True, alpha=0.3)
    for i, (r2, adj_r2) in enumerate(zip(quality_df['R²'], quality_df['Adj R²'])):
        ax1.text(i - width/2, r2 + 0.01, f'{r2:.3f}', ha='center', va='bottom')
        ax1.text(i + width/2, adj_r2 + 0.01, f'{adj_r2:.3f}', ha='center', va='bottom')
    colors = ['skyblue' if q == 'Висока' else 'lightgreen' if q == 'Задовільна'
              else 'orange' if q == 'Низька' else 'lightcoral'
              for q in quality_df['Quality']]
    bars = ax2.bar(quality_df['Cluster'], quality_df['Observations'], color=colors, alpha=0.7)
    ax2.set_xlabel('Кластери')
    ax2.set_ylabel('Кількість спостережень')
    ax2.set_title('Обсяг даних по кластерах', fontweight='bold')
    ax2.tick_params(axis='x', rotation=45)
    ax2.grid(True, alpha=0.3)
    for bar, obs in zip(bars, quality_df['Observations']):
        ax2.text(bar.get_x() + bar.get_width()/2, bar.get_height() + max(quality_df['Observations'])*0.01,
                  f'{obs}', ha='center', va='bottom')
    ax3.bar(quality_df['Cluster'], quality_df['Regions'], color='lightsteelblue', alpha=0.7)

```

```

ax3.set_xlabel('Кластери')
ax3.set_ylabel('Кількість регіонів')
ax3.set_title('Кількість регіонів по кластерах', fontweight='bold')
ax3.tick_params(axis='x', rotation=45)
ax3.grid(True, alpha=0.3)
for i, regions in enumerate(quality_df['Regions']):
    ax3.text(i, regions + max(quality_df['Regions'])*0.01, f'{regions}', ha='center', va='bottom')
plt.tight_layout()
plt.savefig('model_quality.png', dpi=300, bbox_inches='tight')
plt.show()
print("Таблиця якості моделей:")
display_df = quality_df[['Cluster', 'R²', 'Adj R²', 'Quality', 'Observations', 'Regions']].copy()
display_df['R²'] = display_df['R²'].round(4)
display_df['Adj R²'] = display_df['Adj R²'].round(4)
print(display_df.to_string(index=False))

def create_diagnostic_plots(final_models):
    print("Діагностичні графіки")
    for cluster_id, model_info in final_models.items():
        print(f'Діагностика для кластеру {cluster_id}:')
        model = model_info['model']
        residuals = model.resid
        fitted = model.fittedvalues
        setup_visualization_style()
        fig, (ax1, ax2) = plt.subplots(1, 2, figsize=(12, 6))
        fig.suptitle(f'Діагностичні графіки для кластера {cluster_id}', fontsize=16, fontweight='bold')
        stats.probplot(residuals, dist="norm", plot=ax1)
        ax1.set_title('Q-Q plot для нормальності залишків')
        ax1.grid(True, alpha=0.3)
        ax2.hist(residuals, bins=15, density=True, alpha=0.7, color='skyblue')
        ax2.set_xlabel('Залишки')
        ax2.set_ylabel('Щільність')
        ax2.set_title('Розподіл залишків')
        ax2.grid(True, alpha=0.3)
        xmin, xmax = ax2.get_xlim()
        x = np.linspace(xmin, xmax, 100)
        p = stats.norm.pdf(x, np.mean(residuals), np.std(residuals))
        ax2.plot(x, p, 'r-', linewidth=2)
        plt.tight_layout()
        plt.savefig(f'diagnostic_plots_cluster_{cluster_id}.png', dpi=300, bbox_inches='tight')
        plt.show()
        print(f'Статистичні тести для кластеру {cluster_id}:')
        jb_stat, jb_pvalue = stats.jarque_bera(residuals)
        print(f'Тест Jarque-Bera: статистика = {jb_stat:.4f}, p-value = {jb_pvalue:.4f}')
        dw_statistic = sm.stats.stattools.durbin_watson(residuals)
        print(f'Тест Дурбіна-Ватсона: {dw_statistic:.4f}')
        try:
            bp_test = sm.stats.diagnostic.het_breuschpagan(residuals, model.model.exog)
            print(f'Тест Бройша-Пагана: статистика = {bp_test[0]:.4f}, p-value = {bp_test[1]:.4f}')
        except:
            print("Тест Бройша-Пагана: не вдалося виконати")

```

```

def create_comprehensive_summary(final_models):
    print("Комплексний звіт по регресійним моделям")
    for cluster_id, model_info in final_models.items():
        print(f"Кластер {cluster_id} - детальний аналіз")
        print("-" * 50)
        model = model_info['model']
        print(f"Основна інформація:")
        print(f"• Рівняння: {model_info['equation']}")
        print(f"• Якість моделі: {model_info['quality']}")
        print(f"• R-квадрат: {model_info['rsquared']:.4f}")
        print(f"• Скоригований R-квадрат: {model_info['rsquared_adj']:.4f}")
        print(f"• F-статистика: {model.fvalue:.4f}")
        print(f"• P-значення F-тесту: {model.f_pvalue:.4f}")
        print(f"• Спостереження: {model_info['clean_data_size']}")
        print(f"• Регіони: {model_info['metadata']['n_regions']}")
        print(f"Значущі змінні:")
        significant_vars = model_info['significant_vars']
        if significant_vars:
            for var in significant_vars:
                coef = model.params[var]
                pval = model.pvalues[var]
                significance = "****" if pval < 0.01 else "***" if pval < 0.05 else ""
                print(f"• {var}: {coef:.4f} {significance} (p = {pval:.4f})")
        else:
            print("• Немає значущих змінних на рівні 10%")
        print(f"Діагностичні тести:")
        residuals = model.resid
        jb_stat, jb_pvalue = stats.jarque_bera(residuals)
        normality = "Нормальність" if jb_pvalue > 0.05 else "Порушення нормальності"
        print(f"• Тест Jarque-Bera: {normality} (p = {jb_pvalue:.4f})")
        dw_statistic = sm.stats.stattools.durbin_watson(residuals)
        autocorr = "Немає автокореляції" if 1.5 <= dw_statistic <= 2.5 else "Можлива автокореляція"
        print(f"• Тест Дурбіна-Ватсона: {autocorr} (DW = {dw_statistic:.4f})")
        try:
            bp_test = sm.stats.diagnostic.het_breuschpagan(residuals, model.model.exog)
            hetero = "Гомоскедастичність" if bp_test[1] > 0.05 else "Гетероскедастичність"
            print(f"• Тест Бройша-Пагана: {hetero} (p = {bp_test[1]:.4f})")
        except:
            print(f"• Тест Бройша-Пагана: не вдалося виконати")

    print("Запуск візуалізації результатів...")

    try:
        if not final_models_with_spatial:
            print("Немає даних для візуалізації. Моделі не були побудовані.")
        else:
            visualize_regression_coefficients(final_models_with_spatial)
            visualize_model_quality(final_models_with_spatial)
            create_diagnostic_plots(final_models_with_spatial)
            create_comprehensive_summary(final_models_with_spatial)
            print("Візуалізація результатів регресії завершена!")
    except Exception as e:

```

```

print(f'Помилка при візуалізації: {e}')
import traceback
traceback.print_exc()

# Прогнозування незалежних змінних та оцінка якості
from sklearn.linear_model import LinearRegression
from sklearn.metrics import mean_absolute_error, mean_squared_error, r2_score

def mean_absolute_percentage_error(y_true, y_pred):
    mask = y_true != 0
    if np.sum(mask) == 0:
        return 0
    return np.mean(np.abs((y_true[mask] - y_pred[mask]) / y_true[mask])) * 100

def ensure_non_negative_forecast(forecast, lower_bound, upper_bound, variable_name):
    if variable_name in ['attacks', 'planned_vs_actual_outages', 'smart_meter', 'investment_region']:
        forecast = max(0, forecast)
        lower_bound = max(0, lower_bound)
        upper_bound = max(0, upper_bound)
    elif variable_name == 'smart_meter':
        forecast = max(0, forecast)
        lower_bound = max(0, lower_bound)
        upper_bound = max(0, upper_bound)
    return forecast, lower_bound, upper_bound

def format_equation(intercept, coef, variable_name):
    if abs(coef) < 0.001:
        coef_str = f'{coef:.2e}'
    else:
        coef_str = f'{coef:.2f}'
    if intercept >= 0:
        equation = f'{variable_name} = {coef_str}×year + {intercept:.2f}'
    else:
        equation = f'{variable_name} = {coef_str}×year - {abs(intercept):.2f}'
    return equation

def forecast_and_evaluate(panel_datasets):
    print("Прогнозування незалежних змінних та оцінка якості")
    variables_to_forecast = ['investment_region', 'attacks', 'planned_vs_actual_outages', 'smart_meter']
    forecast_results = {}
    cluster_models_summary = {}

    for cluster_id, cluster_info in panel_datasets.items():
        print(f'Кластер {cluster_id} - прогнозування')
        cluster_data = cluster_info['data'].reset_index()
        regions = cluster_data['region'].unique()
        cluster_forecasts = {}
        cluster_equations = {}

        for region in regions:
            print(f'Період: {region}')
            region_data = cluster_data[cluster_data['region'] == region].sort_values('year')

```

```

region_forecasts = {}
region_equations = []

for var in variables_to_forecast:
    X = region_data[['year']].values
    y = region_data[var].values
    if len(X) < 2:
        print(f" {var}: недостатньо даних для прогнозу")
        continue
    model = LinearRegression()
    model.fit(X, y)
    last_year = region_data['year'].max()
    next_year = last_year + 1
    forecast = model.predict([[next_year]])[0]
    n = len(X)
    if n > 2:
        mse = np.mean((y - model.predict(X)) ** 2)
        se = np.sqrt(mse * (1 + 1/n + (next_year - np.mean(X))**2 / np.sum((X - np.mean(X))**2)))
        t_value = stats.t.ppf(0.975, n-2)
        lower_bound = forecast - t_value * se
        upper_bound = forecast + t_value * se
    else:
        lower_bound = forecast * 0.7
        upper_bound = forecast * 1.3
    forecast, lower_bound, upper_bound = ensure_non_negative_forecast(
        forecast, lower_bound, upper_bound, var
    )
    y_pred = model.predict(X)
    mae = mean_absolute_error(y, y_pred)
    rmse = np.sqrt(mean_squared_error(y, y_pred))
    r2 = r2_score(y, y_pred)
    mape = mean_absolute_percentage_error(y, y_pred)
    equation = format_equation(model.intercept_, model.coef_[0], var)
    region_equations.append(equation)
    region_forecasts[var] = {
        'forecast': forecast,
        'lower_bound': lower_bound,
        'upper_bound': upper_bound,
        'last_value': y[-1],
        'change': forecast - y[-1],
        'change_pct': ((forecast - y[-1]) / y[-1] * 100) if y[-1] != 0 else 0,
        'mae': mae,
        'rmse': rmse,
        'r2': r2,
        'mape': mape,
        'model_coef': model.coef_[0],
        'model_intercept': model.intercept_,
        'equation': equation,
        'model': model
    }
    print(f" {var}:")
    print(f" Прогноз на {next_year}: {forecast:.2f}")

```

```

        print(f" 95% ДІ: [{lower_bound:.2f}, {upper_bound:.2f}]")
        print(f"                Зміна: {region_forecasts[var]['change']:+.2f}
({region_forecasts[var]['change_pct']:+.1f}%)")
        print(f"  Якість: R² = {r2:.3f}, MAPE = {mape:.1f}%")
        print(f"  Модель: {equation}")
        cluster_forecasts[region] = region_forecasts
        cluster_equations[region] = region_equations
        forecast_results[cluster_id] = cluster_forecasts
        cluster_models_summary[cluster_id] = cluster_equations
        print(f"Моделі прогнозування для кластеру {cluster_id}")
        for region, equations in cluster_equations.items():
            print(f"{region}:")
            for eq in equations:
                print(f" {eq}")
    return forecast_results, cluster_models_summary

print("Запуск прогнозування незалежних змінних...")
forecast_results, cluster_models_summary = forecast_and_evaluate(panel_datasets)

def ensure_non_negative_safety_index(prediction, region, scenario):
    if prediction < 0:
        print(f" Корекція: {scenario} сценарій для {region} з {prediction:.2f} на 0.0")
        return 0.0
    return prediction

def calculate_safety_index_scenarios(forecast_results, final_models_with_spatial, panel_datasets):
    print("Розрахунок safety_index для трьох сценаріїв")
    scenarios_results = {}

    for cluster_id, regions_forecasts in forecast_results.items():
        if cluster_id not in final_models_with_spatial:
            print(f"Для кластера {cluster_id} немає регресійної моделі")
            continue
        print(f"Кластер {cluster_id}")
        cluster_scenarios = {}
        model_info = final_models_with_spatial[cluster_id]
        model = model_info['model']
        params = model.params
        significant_vars = model_info['significant_vars']
        equation = model_info['equation']
        print(f"Рівняння: {equation}")
        print(f"Значущі змінні: {' '.join(significant_vars)}")
        print(f"Якість моделі: {model_info['quality']} (R² adj = {model_info['rsquared_adj']:.3f})")
        cluster_data = panel_datasets[cluster_id]['data'].reset_index()

        for region, forecasts in regions_forecasts.items():
            print(f"Регіон: {region}")
            region_data = cluster_data[cluster_data['region'] == region].sort_values('year')
            last_actual_safety = region_data['safety_index'].iloc[-1] if len(region_data) > 0 else None
            scenarios = {
                'реалістичний': {},
                'оптимістичний': {},

```

```

        'песимістичний': {}
    }
    for var in forecasts.keys():
        if var in significant_vars:
            scenarios['реалістичний'][var] = forecasts[var]['forecast']
            coef_sign = 1 if params[var] > 0 else -1
            if coef_sign > 0:
                scenarios['оптимістичний'][var] = forecasts[var]['upper_bound']
                scenarios['песимістичний'][var] = forecasts[var]['lower_bound']
            else:
                scenarios['оптимістичний'][var] = forecasts[var]['lower_bound']
                scenarios['песимістичний'][var] = forecasts[var]['upper_bound']
    safety_index_predictions = {}
    for scenario_name, scenario_vars in scenarios.items():
        if scenario_vars:
            try:
                scenario_data = pd.DataFrame([scenario_vars])
                scenario_data = sm.add_constant(scenario_data)
                missing_cols = set(model.model.exog_names) - set(scenario_data.columns)
                for col in missing_cols:
                    if col == 'const':
                        scenario_data[col] = 1.0
                    else:
                        scenario_data[col] = 0.0
                scenario_data = scenario_data[model.model.exog_names]
                prediction = model.predict(scenario_data.iloc[0])[0]
                prediction = ensure_non_negative_safety_index(prediction, region, scenario_name)
                safety_index_predictions[scenario_name] = prediction
                print(f" {scenario_name.capitalize()} сценарій: {prediction:.2f}")
            except Exception as e:
                print(f" Помилка при прогнозуванні {scenario_name} сценарію: {e}")
                prediction = params.get('const', 0)
                for var, value in scenario_vars.items():
                    prediction += params.get(var, 0) * value
                prediction = ensure_non_negative_safety_index(prediction, region, scenario_name)
                safety_index_predictions[scenario_name] = prediction
                print(f" {scenario_name.capitalize()} сценарій (ручний): {prediction:.2f}")
    cluster_scenarios[region] = {
        'scenarios': scenarios,
        'safety_index_predictions': safety_index_predictions,
        'last_actual_safety': last_actual_safety
    }
    scenarios_results[cluster_id] = cluster_scenarios
    return scenarios_results

print("Розрахунок сценаріїв safety_index...")
scenarios_results = calculate_safety_index_scenarios(forecast_results, final_models_with_spatial,
panel_datasets)

def analyze_forecast_quality(forecast_results):
    print("Аналіз якості прогнозів по кластерах")
    quality_summary = {}

```

```

for cluster_id, regions_forecasts in forecast_results.items():
    print(f'Кластер {cluster_id}')
    print(f'Кількість регіонів: {len(regions_forecasts)}')
    cluster_metrics = {
        'total_regions': len(regions_forecasts),
        'variables_forecasted': [],
        'avg_r2': {},
        'avg_mape': {},
        'quality_distribution': {}
    }
    for var in ['investment_region', 'attacks', 'planned_vs_actual_outages', 'smart_meter']:
        r2_scores = []
        mape_scores = []
        quality_counts = {'Відмінна': 0, 'Добра': 0, 'Посередня': 0, 'Погана': 0}
        for region, forecasts in regions_forecasts.items():
            if var in forecasts:
                r2 = forecasts[var]['r2']
                mape = forecasts[var]['mape']
                r2_scores.append(r2)
                mape_scores.append(mape)
                if r2 > 0.8 and mape < 10:
                    quality_counts['Відмінна'] += 1
                elif r2 > 0.6 and mape < 20:
                    quality_counts['Добра'] += 1
                elif r2 > 0.4 and mape < 30:
                    quality_counts['Посередня'] += 1
                else:
                    quality_counts['Погана'] += 1
        if r2_scores:
            cluster_metrics['variables_forecasted'].append(var)
            cluster_metrics['avg_r2'][var] = np.mean(r2_scores)
            cluster_metrics['avg_mape'][var] = np.mean(mape_scores)
            cluster_metrics['quality_distribution'][var] = quality_counts
            print(f' {var}:')
            print(f'   Середній R²: {cluster_metrics['avg_r2'][var]:.3f}')
            print(f'   Середній MAPE: {cluster_metrics['avg_mape'][var]:.1f}%')
            print(f'   Якість прогнозів: {quality_counts}')
        quality_summary[cluster_id] = cluster_metrics
    return quality_summary

print("Аналіз якості прогнозів...")
quality_summary = analyze_forecast_quality(forecast_results)

def create_comprehensive_forecast_table(forecast_results, scenarios_results):
    print("Зведена таблиця прогнозів зі сценаріями")
    comprehensive_data = []
    for cluster_id, regions_forecasts in forecast_results.items():
        for region, forecasts in regions_forecasts.items():
            row = {
                'Кластер': cluster_id,
                'Регіон': region
            }

```

```

for var in ['investment_region', 'attacks', 'planned_vs_actual_outages', 'smart_meter']:
    if var in forecasts:
        row[f'{var}_прогноз'] = forecasts[var]['forecast']
        row[f'{var}_зміна_%'] = forecasts[var]['change_pct']
        row[f'{var}_R2'] = forecasts[var]['r2']
        row[f'{var}_MAPE'] = forecasts[var]['mape']
        row[f'{var}_рівняння'] = forecasts[var]['equation']
    else:
        for suffix in ['прогноз', 'зміна_%', 'R2', 'MAPE', 'рівняння']:
            row[f'{var}_{suffix}'] = None
if cluster_id in scenarios_results and region in scenarios_results[cluster_id]:
    scenario_data = scenarios_results[cluster_id][region]['safety_index_predictions']
    for scenario, value in scenario_data.items():
        row[f'safety_index_{scenario}'] = value
    last_actual = scenarios_results[cluster_id][region].get('last_actual_safety')
    if last_actual is not None:
        row['safety_index_останній_факт'] = last_actual
comprehensive_data.append(row)
comprehensive_df = pd.DataFrame(comprehensive_data)
float_cols = comprehensive_df.select_dtypes(include=['float64']).columns
for col in float_cols:
    if 'рівняння' not in col:
        comprehensive_df[col] = comprehensive_df[col].round(4)
print("Комплексна таблиця прогнозів:")
print(comprehensive_df.to_string(index=False, max_rows=20))
return comprehensive_df

print("Створення комплексної таблиці прогнозів...")
comprehensive_forecasts = create_comprehensive_forecast_table(forecast_results, scenarios_results)

print("Збереження результатів прогнозування")
comprehensive_forecasts.to_csv('comprehensive_forecast_results.csv', index=False, encoding='utf-8-sig')
print("Комплексні результати прогнозування збережено у 'comprehensive_forecast_results.csv'")

models_summary_data = []
for cluster_id, regions_equations in cluster_models_summary.items():
    for region, equations in regions_equations.items():
        for equation in equations:
            var = equation.split('=')[0]
            models_summary_data.append({
                'Кластер': cluster_id,
                'Регіон': region,
                'Змінна': var,
                'Рівняння_моделі': equation
            })
models_summary_df = pd.DataFrame(models_summary_data)
models_summary_df.to_csv('forecast_models_summary.csv', index=False, encoding='utf-8-sig')
print("Інформацію про моделі прогнозування збережено у 'forecast_models_summary.csv'")

detailed_scenario_data = []
for cluster_id, regions_scenarios in scenarios_results.items():

```

```

for region, data in regions_scenarios.items():
    row = {
        'Кластер': cluster_id,
        'Регіон': region,
        'Останній_факт_SAIDI': data.get('last_actual_safety', None)
    }
    for scenario, value in data['safety_index_predictions'].items():
        row[f'SAIDI_{scenario}'] = value
    if 'реалістичний' in data['safety_index_predictions']:
        realistic = data['safety_index_predictions']['реалістичний']
        row['SAIDI_реалістичний'] = realistic
        if 'оптимістичний' in data['safety_index_predictions']:
            optimistic = data['safety_index_predictions']['оптимістичний']
            row['Покращення_оптимістичний'] = optimistic - realistic
            row['Покращення_оптимістичний_%'] = ((optimistic - realistic) / realistic) * 100 if realistic
            != 0 else 0
        if 'песимістичний' in data['safety_index_predictions']:
            pessimistic = data['safety_index_predictions']['песимістичний']
            row['Погіршення_песимістичний'] = pessimistic - realistic
            row['Погіршення_песимістичний_%'] = ((pessimistic - realistic) / realistic) * 100 if realistic
            != 0 else 0
        detailed_scenario_data.append(row)
    detailed_scenario_df = pd.DataFrame(detailed_scenario_data)
    detailed_scenario_df.to_csv('detailed_scenario_analysis.csv', index=False, encoding='utf-8-sig')
    print("Детальний аналіз сценаріїв збережено у 'detailed_scenario_analysis.csv'")

quality_df = pd.DataFrame.from_dict(quality_summary, orient='index')
quality_df.to_csv('forecast_quality_analysis.csv', encoding='utf-8-sig')
print("Аналіз якості прогнозів збережено у 'forecast_quality_analysis.csv'")

print("Прогнозування та аналіз сценаріїв завершено!")

negative_saidi_count = 0
total_predictions = 0
for cluster_id, regions_scenarios in scenarios_results.items():
    for region, data in regions_scenarios.items():
        for scenario, value in data['safety_index_predictions'].items():
            total_predictions += 1
            if value < 0:
                negative_saidi_count += 1
                print(f'{region} (кластер {cluster_id}): {scenario} SAIDI = {value:.2f}')
if negative_saidi_count == 0:
    print("Всі значення SAIDI невід'ємні!")
else:
    print(f'Знайдено {negative_saidi_count} від'ємних значень SAIDI з {total_predictions}')

print(f'Підсумкова статистика:')
print(f'• Кількість кластерів: {len(scenarios_results)}')
print(f'• Загальна кількість регіонів: {sum(len(regions) for regions in scenarios_results.values())}')
print(f'• Загальна кількість прогнозів SAIDI: {total_predictions}')
print(f'• Загальна кількість моделей прогнозування: {len(models_summary_df)}')

```