

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

КАФЕДРА ЕКОНОМІЧНОЇ КІБЕРНЕТИКИ

«На правах рукопису»
УДК 338.27:620.9

ДО ЗАХИСТУ ДОПУЩЕНО:

Завідувач кафедри

_____ Катерина БОЯРИНОВА

«__» грудня 2024 р.

МАГІСТЕРСЬКА ДИСЕРТАЦІЯ

**на здобуття ступеня магістра
за освітньо-професійною програмою**

«Економічна аналітика»

зі спеціальності 051 Економіка

**на тему: «Компаративна аналітика економічного потенціалу
енергетичного сектору»**

Виконав:

студент 2-го курсу, групи УА-31мп
БЕРДНИК Ігор Федорович

Науковий керівник:

Доцент кафедри економічної кібернетики, д.е.н., проф.
РОЩИНА Надія Василівна

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

Студент _____

Київ – 2024 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

«20» червня 2024 р.

ЗАВДАННЯ

на магістерську дисертацію студенту

БЕРДНИКУ Ігорю Федоровичу

- 1. Тема дисертації** «Компаративна аналітика економічного потенціалу енергетичного сектору», науковий керівник дисертації Рощина Надія Василівна, к.е.н., доцент, затверджені наказом по університету від 08.11.2024 року № 5019-с.
- 2. Термін подання студентом дисертації** 09.12.2024 року.
- 3. Об'єкт дослідження:** економічний потенціал енергетичного сектору.
- 4. Предмет дослідження (Вихідні дані):** сукупність теоретичних та практичних положень компаративної аналітики економічного потенціалу енергетичного сектору. Вихідними даними є законодавчі й нормативні акти України, статистичні дані, Державної служби статистики України, аналітичні матеріали, звіти міжнародних енергетичних організацій (IEA, IRENA).

5. Перелік завдань, які потрібно розробити:

а) теоретична частина:

- розкрити сутність та ключові характеристики компаративної аналітики в енергетичному секторі.
- дослідити чинники, що впливають на економічний потенціал традиційних та відновлюваних джерел енергії.
- обґрунтувати теоретичні підходи до компаративної аналітики енергетичного сектору.

б) аналітична частина:

- аналіз та оцінювання сучасного стану енергетичного сектору
- провести компаративна аналітика ефективності використання різних видів енергії
- провести моделювання з прикладної компаративної аналітики економічного потенціалу енергетичного сектору.

в) рекомендаційна частина:

- сформулювати висновки та надати рекомендації щодо вдосконалення методів компаративної аналітики економічного потенціалу енергетичного сектору
- розробка і аналіз сценаріїв підвищення економічного потенціалу енергетичного сектору.
- оцінювання економічних результатів з підвищення економічного потенціалу.

6. Орієнтовний перелік ілюстративного матеріалу:

- 1) Світове споживання первинної енергії за джерелами
- 2) Динаміка викидів парникових газів
- 3) Щорічне глобальне збільшення потужностей відновлюваної енергетики, 2010-2023 рр
- 4) Ваги критерій
- 5) Наглядна частина оцінок джерел енергії
- 6) Візуалізація оцінок
- 7) Статистика результатів Монте-Карло
- 8) Графік щільності розподілу
- 9) Розподілу часток джерел енергії в Україні
- 10) Статистичний розподіл TOPSIS Score
- 11) Динаміка відновлювальних джерел

7. Орієнтовний перелік публікацій за напрямом роботи:

- 1) тези доповіді на Міжнародній науково-практичній конференції.

8. Дата видачі завдання: 19 червня 2024 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.	01.06.2024- 20.06.2024	
2.	Збір необхідної інформації, вивчення та аналіз літературних джерел щодо досліджуваної тематики.	21.06.2024- 05.09.2024	
3.	Розгляд теоретичних засад компаративної аналітики економічного потенціалу енергетичного сектору. Надання на	06.09.2024- 23.09.2024	
4.	Компаративна аналітика сучасного стану енергетичного сектору країн.	24.09.2024- 30.09.2024	
5.	Аналітика та оцінювання ефективності використання різних видів енергії.	01.10.2024- 14.10.2024	
6.	Моделювання з прикладної компаративної аналітики економічного потенціалу	15.10.2024- 21.10.2024	
7.	Вдосконалення методів компаративної аналітики економічного потенціалу	22.10.2024- 04.11.2024	
8.	Розробка і аналіз сценаріїв підвищення економічного потенціалу енергетичного	05.11.2024- 11.11.2024	
9.	Оцінювання економічних результатів з підвищення економічного потенціалу.	12.11.2024- 18.11.2024	
10.	Оформлення магістерської дисертації другого (магістерського) рівня вищої освіти.	19.11.2024- 28.11.2024	
11.	Подання магістерської дисертації для перевірки на збіг/схожість, отримання відгуку керівника та рецензії.	29.11.2024- 06.12.2024	
12.	Подання магістерської дисертації до захисту.	09.12.2024	

Студент

Ігор БЕРДНИК

Науковий керівник

Надія РОЩИНА

РЕФЕРАТ

Магістерська дисертація Бердника Ігоря Федоровича на тему «Компаративна аналітика економічного потенціалу енергетичного сектору» зі спеціальності 051 Економіка, освітньо-професійної програми «Економічна аналітика», Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», 2024, Київ.

Магістерська дисертація складається зі вступу, 3 розділів, висновків, списку використаних джерел та додатків. Виконана в обсязі 100 сторінок, містить 28 рисунків, 3 таблиці.

Актуальність теми. Сучасний енергетичний сектор переживає значні трансформації у контексті глобальних викликів, таких як зростання попиту на енергію, перехід до низьковуглецевих технологій і забезпечення енергетичної безпеки. Компаративна аналітика, яка дозволяє порівнювати різні джерела енергії з урахуванням економічних, екологічних і соціальних факторів, є ключовим інструментом для формування стратегій сталого розвитку. Це дослідження відповідає потребам сучасної енергетичної економіки, адже спрямоване на розробку методології оцінки енергетичних ресурсів у порівняльному аспекті.

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 та моделювання економічного розвитку в імперативах Trans Tech» (№ ДР 0123U101760). Роль автора полягає у вдосконаленні методичних підходів до багатокритеріального аналізу енергетичних ресурсів із використанням методу TOPSIS. Автор адаптував цей метод до потреб енергетичного сектора, враховуючи економічні, екологічні та соціальні критерії, що є актуальним у контексті сталого розвитку та підвищення ефективності використання енергетичних ресурсів.

Метою магістерською дисертації є компаративна аналітика економічного потенціалу енергетичного сектору, що охоплює удосконалення методичних підходів до оцінки економічного потенціалу традиційних і відновлюваних джерел енергії, виконання їх компаративного аналізу та розробку практичних рекомендацій для прийняття рішень, спрямованих на підвищення економічного потенціалу енергетичного сектора.

Завдання дослідження: розкрити сутність та ключові характеристики компаративної аналітики в енергетичному секторі, дослідити чинники, що впливають на економічний потенціал традиційних та відновлюваних джерел енергії, обґрунтувати теоретичні підходи до компаративної аналітики енергетичного сектору, аналіз та оцінювання сучасного стану енергетичного сектору, провести компаративна аналітика ефективності використання різних видів

енергії, провести моделювання з прикладної компаративної аналітики економічного потенціалу енергетичного сектору, сформувавши висновки та надати рекомендації щодо вдосконалення методів компаративної аналітики економічного потенціалу енергетичного сектору, розробка і аналіз сценаріїв підвищення економічного потенціалу енергетичного сектору, оцінювання потенційних напрямків розвитку енергетичного сектору.

Об'єкт дослідження є економічний потенціал енергетичного сектору.

Предмет дослідження є сукупність теоретичних та практичних положень компаративної аналітики економічного потенціалу енергетичного сектору. Вихідними даними є законодавчі й нормативні акти України, статистичні дані, Державної служби статистики України, аналітичні матеріали, звіти міжнародних енергетичних організацій (IEA, IRENA).

Методи дослідження. У роботі використовувалися методи індукції, дедукції, системного аналізу для теоретичного обґрунтування проблематики, статистичні методи для аналізу динаміки показників енергетичного сектору, а також багатокритеріальний аналіз, для оцінювання та ранжування джерел енергії за економічними, екологічними та соціальними критеріями.

Наукова новизна. Новизна дослідження полягає в адаптації методу TOPSIS до проведення компаративної аналітики та оцінки енергетичних ресурсів за багатокритеріальними показниками, що враховують не лише економічну доцільність, але й екологічні та соціальні фактори. Удосконалено підходи до інтеграції аналізу великих даних у компаративну оцінку джерел енергії.

Практичне значення отриманих результатів. Отримані результати можуть бути використані при формуванні стратегій розвитку економічного потенціалу енергетичного сектору, удосконаленні інструментарію компаративної аналітики та оцінки ефективності інвестицій у традиційні та відновлювані джерела енергії. Поряд з цим, отримані результати сприяють покращенню прийняття рішень у контексті енергетичної безпеки та сталого розвитку.

Апробація результатів магістерської дисертації:

1. Бердник І.Ф., Трофименко О.О. Інноваційні технології декарбонізації: перспективи інтеграції штучного інтелекту в енергетичний сектор. *Матеріали XVIII Міжнар. наук.-практ. конф.*, м. Київ, 5 груд. 2024 р. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2024. URL: <https://ecocyber.fmm.kpi.ua/uk/ nauka/regulyarni-naukovi-zahody/konferencziyi/>

Ключові слова: економічна аналітика, компаративна аналітика, енергетичний сектор, економічний потенціал, відновлювані джерела енергії, традиційні джерела енергії, багатокритеріальний аналіз, метод TOPSIS.

ABSTRACT

Master's thesis by Ihor Fedorovych Berdnyk on 'Comparative Analytics of the Economic Potential of the Energy Sector' in the specialty 051 Economics, Educational and Professional Programme 'Economic Analytics', National Technical University of Ukraine 'Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute', 2024, Kyiv.

The master's thesis consists of an introduction, 3 chapters, conclusions, a list of references and appendices. It is made in the volume of 100 pages, contains 28 figures, 3 tables.

The relevance of the topic. The modern energy sector is undergoing significant transformations in the context of global challenges, such as rising energy demand, transition to low-carbon technologies and energy security. Comparative analytics, which allows comparing different energy sources with regard to economic, environmental and social factors, is a key tool for formulating sustainable development strategies. This study meets the needs of the modern energy economy, as it aims to develop a methodology for assessing energy resources in a comparative perspective.

Connection of work with scientific programs, plans, topics. The master's thesis was carried out 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 and Modelling of Economic Development in the Trans Tech Imperatives' (No. DR 0123U101760). The author's role is to improve methodological approaches to multicriteria analysis of energy resources using the TOPSIS method. The author has adapted this method to the needs of the energy sector, taking into account economic, environmental and social criteria, which is relevant in the context of sustainable development and increasing the efficiency of energy resources.

The purpose of study thesis is a comparative analysis of the economic potential of the energy sector, which includes improving methodological approaches to assessing the economic potential of traditional and renewable energy sources, performing their comparative analysis and developing practical recommendations for decision-making aimed at increasing the economic potential of the energy sector.

Research objectives. To reveal the essence and key characteristics of comparative analytics in the energy sector, to investigate the factors influencing the economic potential of traditional and renewable energy sources, to substantiate theoretical approaches to comparative analytics of the energy sector, to analyse and assess the current state of the energy sector, to conduct comparative analytics of the efficiency of using different types of energy, to conduct modelling on applied comparative analytics of the economic potential of the energy sector, to formulate conclusions and

The object of the study is the economic potential of the energy sector.

The subject of the study is a set of theoretical and practical provisions of comparative analytics of the economic potential of the energy sector. The source data are legislative and regulatory acts of Ukraine, statistical data of the State Statistics Service of

Ukraine, analytical materials, reports of international energy organisations (IEA, IRENA).

Research methods. The study used the methods of induction, deduction, system analysis for theoretical substantiation of the problem, statistical methods for analysing the dynamics of energy sector indicators, as well as multicriteria analysis for evaluating and ranking energy sources according to economic, environmental and social criteria.

Scientific novelty of the results. The novelty of the study lies in the adaptation of the TOPSIS method to conduct comparative analysis and assessment of energy resources by multicriteria indicators that take into account not only economic feasibility, but also environmental and social factors. Approaches to integrating big data analysis into the comparative assessment of energy sources have been improved.

Practical significance of the results. The results can be used in formulating strategies for developing the economic potential of the energy sector, improving the tools of comparative analytics and assessing the effectiveness of investments in traditional and renewable energy sources. At the same time, the results obtained help to improve decision-making in the context of energy security and sustainable development.

Approbation of work results.

Berdnyk I.F., Trofymenko O.O. Innovative technologies of decarbonisation: prospects for the integration of artificial intelligence into the energy sector. Proceedings of the XVIII International Scientific and Practical Conference, Kyiv, 5 December. 2024. Kyiv: Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute, 2024. URL: <https://ecocyber.fmm.kpi.ua/uk/nauka/regulyarni-naukovi-zahody/konferencziyi/>.

Keywords: *economic analytics, comparative analytics, energy sector, economic potential, renewable energy sources, traditional energy sources, multicriteria analysis, TOPSIS method.*

ЗМІСТ

ВСТУП.....	10
1 ТЕОРЕТИКО-МЕТОДИЧНІ ПІДХОДИ ДО КОМПАРАТИВНОЇ АНАЛІТИКИ ЕКОНОМІЧНОГО ПОТЕНЦІАЛУ ЕНЕРГЕТИЧНОГО СЕКТОРУ	13
1.1 Теоретичні засади компаративної аналітики в енергетичному секторі	13
1.2 Чинники впливу на економічний потенціал традиційних та відновлюваних джерел енергії.....	23
1.3 Теоретичні підходи компаративної аналітики енергетичного сектору.....	31
Висновки до першого розділу	44
2 ЕКОНОМІЧНА АНАЛІТИКА ДЖЕРЕЛ ЕНЕРГІЇ: ДІАГНОСТИКА ТА АНАЛІТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ	46
2.1 Аналіз та оцінювання сучасного стану енергетичного сектору.....	46
2.2 Компаративна аналітика ефективності використання різних видів енергії .	56
2.3 Моделювання з прикладної компаративної аналітики економічного потенціалу енергетичного сектору.....	66
Висновки до другого розділу	75
3 НАПРЯМИ ПІДВИЩЕННЯ ЕКОНОМІЧНОГО ПОТЕНЦІАЛУ ЕНЕРГЕТИЧНОГО СЕКТОРУ	78
3.1 Вдосконалення методів компаративної аналітики економічного потенціалу енергетичного сектору.....	78
3.2 Розробка і аналіз сценаріїв підвищення економічного потенціалу енергетичного сектору.....	85
3.3 Оцінювання потенційних напрямків розвитку енергетичного сектору	96
Висновки до третього розділу	105
ВИСНОВКИ.....	107
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	110

ВСТУП

Актуальність. Сучасний енергетичний сектор переживає значні трансформації у контексті глобальних викликів, таких як зростання попиту на енергію, перехід до низьковуглецевих технологій і забезпечення енергетичної безпеки. Компаративна аналітика, яка дозволяє порівнювати різні джерела енергії з урахуванням економічних, екологічних і соціальних факторів, є ключовим інструментом для формування стратегій сталого розвитку. Це дослідження відповідає потребам сучасної енергетичної економіки, адже спрямоване на розробку методології оцінки енергетичних ресурсів у порівняльному аспекті.

Питанням аналітики економічної ефективності енергетичних систем займалися такі дослідники, як Трофименко О.О., Іляш О.І., та Бояринова К.О. Зокрема, Трофименко О. О. у своїх публікаціях акцентує увагу на впливі інноваційних технологій на розвиток відновлюваної енергетики та декарбонізацію економіки, аналізуючи глобальні тенденції енергетичної політики. Іляш О. І. досліджує моделі енергетичного розвитку, наголошуючи на важливості впровадження інтегрованих підходів до управління енергетичними ресурсами для підвищення економічної безпеки. Бояринова К.О. досліджує проблеми інноваційного розвитку підприємств, включаючи оцінку їх функціонального стану та адаптивності до сучасних технологічних викликів.

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 та моделювання економічного розвитку в імперативах Trans Tech» (№ ДР 0123U101760). Роль автора полягає у вдосконаленні методичних підходів до багатокритеріального аналізу енергетичних ресурсів із використанням методу TOPSIS. Автор адаптував цей метод до потреб енергетичного сектора, враховуючи економічні, екологічні та соціальні критерії, що є актуальним у

контексті сталого розвитку та підвищення ефективності використання енергетичних ресурсів.

Метою магістерською дисертації є компаративна аналітика економічного потенціалу енергетичного сектору, що охоплює удосконалення методичних підходів до оцінки економічного потенціалу традиційних і відновлюваних джерел енергії, виконання їх компаративного аналізу та розробку практичних рекомендацій для прийняття рішень, спрямованих на підвищення економічного потенціалу енергетичного сектора.

Відповідно до поставленої мети було вирішено такі завдання:

- розкрити сутність та ключові характеристики компаративної аналітики в енергетичному секторі.
- дослідити чинники, що впливають на економічний потенціал традиційних та відновлюваних джерел енергії.
- обґрунтувати теоретичні підходи до компаративної аналітики енергетичного сектору.
- аналіз та оцінювання сучасного стану енергетичного сектору
- провести компаративна аналітика ефективності використання різних видів енергії
- провести моделювання з прикладної компаративної аналітики економічного потенціалу енергетичного сектору.
- сформулювати висновки та надати рекомендації щодо вдосконалення методів компаративної аналітики економічного потенціалу енергетичного сектору
- розробка і аналіз сценаріїв підвищення економічного потенціалу енергетичного сектору.
- оцінювання потенційних напрямків розвитку енергетичного сектору.

Об'єкт дослідження є економічний потенціал енергетичного сектору.

Предмет дослідження є сукупність теоретичних та практичних положень компаративної аналітики економічного потенціалу енергетичного сектору.

Базою дослідження є ТОВ «УМАНЬ ТРЕ» - підприємство відновлюваної

енергетики, що знаходиться в Черкаській області та спеціалізується на виробництві електроенергії з сонячної енергії.

Методи дослідження. У роботі використовувалися методи індукції, дедукції, системного аналізу для теоретичного обґрунтування проблематики, статистичні методи для аналізу динаміки показників енергетичного сектору, а також багатокритеріальний аналіз, для оцінювання та ранжування джерел енергії за економічними, екологічними та соціальними критеріями.

Наукова новизна. Новизна дослідження полягає в адаптації методу TOPSIS до проведення компаративної аналітики та оцінки енергетичних ресурсів за багатокритеріальними показниками, що враховують не лише економічну доцільність, але й екологічні та соціальні фактори. Удосконалено підходи до інтеграції аналізу великих даних у компаративну оцінку джерел енергії.

Практичне значення отриманих результатів. Отримані результати можуть бути використані при формуванні стратегій розвитку економічного потенціалу енергетичного сектору, удосконаленні інструментарію компаративної аналітики та оцінки ефективності інвестицій у традиційні та відновлювані джерела енергії. Поряд з цим, отримані результати сприяють покращенню прийняття рішень у контексті енергетичної безпеки та сталого розвитку.

Апробація результатів магістерської дисертації.

1. Бердник І.Ф., Трофименко О.О. Інноваційні технології декарбонізації: перспективи інтеграції штучного інтелекту в енергетичний сектор. *Матеріали XVIII Міжнар. наук.-практ. конф.*, м. Київ, 5 груд. 2024 р. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2024. URL: <https://ecocyber.fmm.kpi.ua/uk/nauka/regulyarni-naukovi-zahody/konferencziyi/>

1 ТЕОРЕТИКО-МЕТОДИЧНІ ПІДХОДИ ДО КОМПАРАТИВНОЇ АНАЛІТИКИ ЕКОНОМІЧНОГО ПОТЕНЦІАЛУ ЕНЕРГЕТИЧНОГО СЕКТОРУ

1.1 Теоретичні засади компаративної аналітики в енергетичному секторі

Багато країн світу докладають значних зусиль для розробки та впровадження більш ефективних стратегій управління енергією. Мета полягає у використанні останніх досягнень у галузі технологій на електростанціях та лініях електропередач для вирішення нагальних соціальних проблем та зменшення екологічних ризиків, з якими стикається суспільство. Крім того, вирішуючи проблеми безпеки як для людей, так і для електроенергетики, ці країни сподіваються позитивно вплинути на навколишнє середовище.

Для успішного вирішення цих завдань в електроенергетиці швидко і безперервно впроваджуються революційні матеріальні та технічні інновації. Такий безпрецедентний темп змін і складний комплекс процесів зумовлюють необхідність постійного дослідження детермінант і впливів, що формують розвиток електроенергетики. Такі дослідження повинні враховувати не лише специфічні складові галузі, але й складну динаміку енергосистем, в яких ці складові взаємодіють.

Компаративна аналітика дає критичну оцінку елементів роботи системи у порівнянні з іншими. Порівняльна аналітика все частіше стає важливим елементом зовнішнього та внутрішнього оперативного управління комунальними підприємствами та відповідним інструментом прийняття рішень в енергетичній політиці. На початку 21-го століття з'явився новий поштовх до вимірювання ефективності енергетичного сектору, оскільки енергетична безпека, екологічні та економічні показники починають домінувати в цьому секторі. Сучасний енергетичний сектор переживає період безпрецедентних трансформацій, стикаючись з викликами глобалізації, зміни клімату, технологічного прогресу та

зростаючого попиту на енергію. У цьому динамічному середовищі компаративна аналітика виступає ключовим інструментом для підвищення ефективності, зниження витрат та мінімізації негативного впливу на довкілля [1]. Компаративна аналітика — це не просто аналіз і порівняння даних, а комплексний підхід, що охоплює управління даними, інтелектуальний аналіз, прогнозне моделювання, машинне навчання та візуалізацію. Вона дозволяє перетворити сирі дані на цінну маркетингову інформацію, яка використовується для прийняття рішень на всіх рівнях управління — стратегічному, тактичному та оперативному. Компанії і навіть уряд країн, що ефективно використовують аналітику, отримують значну конкурентну перевагу в сучасних умовах. У контексті зростаючої інформатизації, підприємства енергетичного сектору все більше усвідомлюють переваги компаративної аналітики та прийняття рішень на основі даних. Аналітика має значний потенціал для підвищення ефективності, економії витрат, покращення продуктивності, створення нових енергетичних послуг, вдосконалення прогнозування та можливостей передбачення, сприяння управлінню ризиками та пом'якшення цінових коливань. Ключовою ідеєю є те, що аналітика даних допомагає підвищити "економічну стійкість" та орієнтуватися в складнощах енергетичного ринку. Модель секторальної консолідації, що охоплює промисловий, комерційний та побутовий сектори, ілюструє вплив великих даних та нових технологій обробки даних на енергетичний сектор. Використання передової промислової аналітики є ключовим фактором, що відрізняє лідерів галузі від послідовників. Лідери використовують аналітику для розробки стратегій, ідентифікації та обслуговування різноманітних ринків, а також переосмислення бізнес-функцій. Вони повинні швидко інтегрувати та обробляти дані з численних джерел, враховуючи питання безпеки, конфіденційності та масштабованості. Компанії, що застосовують передові аналітичні технології, такі як прогнозне моделювання та інтелектуальний аналіз даних, можуть покращити клієнтський досвід, зменшити витрати, знизити ризики та ефективно прогнозувати продуктивність активів. Інтернет речей та Індустрія 4.0 відкривають

нові можливості для оцифрування управління промисловістю та інфраструктурою [2].

Збір даних є критично важливим етапом компаративної аналітики, особливо в енергетичному секторі, де дані надходять з різноманітних джерел: датчиків, систем ERP та CRM, відкритих джерел та краудсорсингу. Для ефективного аналізу ці дані необхідно зібрати в одному місці та провести попередню обробку для перевірки та підвищення їх якості та цілісності. Постійне зростання обсягів даних створює проблеми з управлінням цією інформацією. Без надійних та прозорих практик управління даними складно забезпечити точність аналізу. Ефективні механізми збору даних та належна якість даних є необхідними умовами для отримання достовірних результатів компаративної аналітики. Сучасні енергетичні компанії стикаються з низкою проблем у цій сфері. Дані часто збираються в різних відділах та зберігаються в неорганізований спосіб, що ускладнює проведення комплексного аналізу, який би охоплював різні підрозділи та періоди часу. До епохи великих даних основна увага приділялася ефективному зберіганню та обробці даних. Зараз же компанії зосереджуються на можливостях, які відкриваються після збору даних. Дані повинні збиратися систематично та регулярно, а аналіз проводиться з різною періодичністю – від хвилин до тижнів. Автоматизований та напівавтоматизований аналіз даних дозволяє прогнозувати відмови обладнання та оцінювати стан системи.

Енергетичний сектор є одним з найбільш інформаційно насичених секторів економіки. Дані збираються з різноманітних джерел, включаючи "розумні" лічильники, пристрої Інтернету речей, історичну статистику енергоспоживання, комерційні польові дослідження та інші. "Розумні" лічильники дозволяють вимірювати споживання енергії в режимі реального часу, а пристрої Інтернету речей збирають інформацію про викиди, стан активів та інші параметри. Однак, зі збором, управлінням та використанням даних пов'язані певні обмеження та виклики, такі як проблеми інтеграції даних, забезпечення якості даних, прозорості, доступності та своєчасності. Важливо враховувати етичні аспекти та питання конфіденційності при роботі з даними. Джерела даних постійно

змінюються та розвиваються разом з технологіями. Наприклад, традиційні польові дослідження доповнюються веб-опитуваннями та мобільним збором даних.

Історичні дані про споживання енергії є цінним джерелом інформації для компаративної аналітики. Вони дозволяють виявити тенденції та закономірності використання енергії в залежності від різних факторів, таких як зміна поведінки споживачів, життєві цикли продуктів та послуг, технологічний прогрес та політика. Аналіз історичних даних допомагає виявити неефективність процесів, деградацію обладнання та оцінити вплив модернізації. Кореляції між споживанням різних видів енергії, наприклад, електроенергії та газу, можуть бути використані для короткострокового прогнозування. Враховуючи очікувану електрифікацію теплопостачання та транспорту, історичні дані можуть покращити якість прогнозів енергетичних моделей. Історичні дані також дозволяють виявити специфічні для країни або культури закономірності споживання, пов'язані з поведінкою споживачів, управлінням навантаженням та іншими факторами. Використання історичних даних для калібрування моделей є важливим способом врахування факторів, які складно включити в модель безпосередньо. Обробка та оцінка історичних даних допомагає зрозуміти коливання споживання та прогнозувати довгострокові тенденції. Основним викликом є забезпечення якості та узгодженості даних, враховуючи вплив погодних умов та соціальної поведінки. Ідеальним варіантом є поєднання обробки даних в режимі реального часу з аналізом історичних даних. Використання великих масивів даних та сучасних методів машинного навчання дозволяє виявити складні взаємозв'язки та покращити точність прогнозів. Історичне споживання енергії є важливим активом для стратегічного планування, оскільки воно відображає поведінку ринку та операційні потреби. Аналіз історичних даних допомагає удосконалити процеси прийняття рішень на всіх рівнях організації. Аналітики оцінюють ризики та можливості, надаючи рекомендації щодо оптимальних курсів дій. Системи підтримки прийняття рішень враховують не тільки якість даних, помилки та складність процесів, але й такі аспекти, як

користувацький інтерфейс та інтерактивність. Хмарні технології дозволяють візуалізувати складні дані та полегшують комунікацію між аналітиками, особами, що приймають рішення, та консультантами. Це сприяє прозорому та партисипативному процесу прийняття рішень. Прикладом використання аналітики для підтримки прийняття рішень є розробка сценаріїв трансформації ланцюгів поставок в енергетичному секторі з урахуванням впровадження технологій відновлюваної енергетики. Оптимізаційні моделі дозволяють оцінити економічну ефективність, надійність постачання та інші ключові показники для різних варіантів розвитку енергетичної системи [2].

Візуалізація даних лежить в основі компаративної аналітики. Саме за допомогою графічного представлення даних отримують уявлення в галузі візуальної аналітики або знань аналітиків і зацікавлених сторін, що передача ключових точок зору в контексті енергетичних даних поглиблює розуміння різних енергетичних систем або змінних. Відповідно, існує багато ресурсів з візуалізації енергетичних даних, які демонструють широкий спектр методів візуалізації даних для передачі різних аспектів енергетичних даних. Зокрема, у цій галузі підкреслюється потенціал використання різних типів діаграм або графіків, карт, енергетичних інформаційних панелей, архітектурних візуалізацій або навіть ігор, створених за допомогою 3D-рушіїв. Дійсно, широта методів, що цінно використовуються, є сильною стороною візуалізації даних у порівнянні з моделюванням енергетичних систем, де існує тенденція примушувати дані вписуватися в існуючі візуальні парадигми або інструменти візуалізації. Насамкінець, слід зазначити, що точні методи візуалізації залежать від вимог цільової аудиторії, а також від цілей дослідження.

Існують загальні принципи, які застосовуються для успішної візуалізації складної інформації, включаючи енергетичні дані. По-перше, візуалізація будь-якого елементу повинна підтримувати користувача у досягненні цілей його дослідницької програми і дозволяти чітко представляти моделі, як для валідації та верифікації, так і для представлення результатів порівняльного аналізу енергетичних систем. По-друге, передовий досвід можна поширювати шляхом

обміну прикладами використання візуалізації в енергетичному аналізі, отриманими в результаті взаємодії з аналітиками даних та експертами в цій галузі. По-третє, ефективна візуалізація сприяє кращому виявленню та інтерпретації знань, що підтверджується інтерактивною взаємодією аналітиків галузі з інструментами, розробленими дослідниками візуалізації порівняльних енергетичних даних. Нарешті, визнається, що існують певні виклики, зокрема, ризик представлення занадто великої кількості інформації за допомогою візуалізації, що призводить до парадоксу перевантаження складності. Крім того, існують виклики у сприянні однаково життєздатному, але конкуруючому принципу підтримки та комунікації однієї історії або тенденції, яка може міститися в даних. Це має вирішальне значення для забезпечення того, щоб комунікація ґрунтувалася на точному, справедливому і адекватному представленні, а це вимагає представлення впливу невизначеностей, що стосуються аспектів візуалізації.

У сфері енергетичної економіки прикладний порівняльний аналіз відіграє вирішальну роль в оцінці економічного потенціалу різних джерел енергії. Порівнюючи різні фактори, такі як вартість, ефективність, вплив на навколишнє середовище та масштабованість, дослідники можуть визначити найбільш життєздатні варіанти для задоволення зростаючих світових потреб в енергії. Іншим важливим фактором у порівняльному аналізі є рівень державного втручання та підтримки різних джерел енергії. Субсидії, податкові пільги та нормативно-правові акти можуть мати значний вплив на економічну життєздатність різних енергетичних проектів.

Крім того, порівняльний аналіз може допомогти визначити можливості для інновацій та технологічного прогресу в енергетичному секторі. Вивчаючи успішні проекти в різних регіонах або країнах, дослідники можуть перейняти передовий досвід і застосувати його до нових розробок. Таке перехресне запилення ідей може призвести до створення більш ефективних та економічно вигідних енергетичних рішень. Це має особливе значення з огляду на збільшення обсягів відновлюваної генерації та пов'язаний з цим рівень невизначеності.

Статистика є наукою про збір, систематизацію та аналіз даних, а також про вивчення закономірностей розвитку явищ. В компаративній аналітиці енергетичного сектору статистика використовується для обробки внутрішніх бізнес-даних та даних про процеси трансформації, що є об'єктом комерційного інтересу. Статистика забезпечує об'єктивну основу для управління ресурсами та прийняття управлінських рішень. Наприклад, у фінансах статистичні методи, такі як регресійний аналіз та аналіз часових рядів, використовуються для оптимізації використання фінансових ресурсів, прогнозування грошових потоків та оцінки вартості бізнесу. Аналіз часових рядів дозволяє виявити тенденції в доходах та прогнозувати продажі. Якщо фактичні дані значно відхиляються від прогнозів, це може сигналізувати про необхідність коригування бізнес-стратегії.

Регресійний аналіз є одним з статистичних методів, що використовуються в аналітиці. Він дозволяє визначити та кількісно оцінити взаємозв'язок між незалежними та залежною змінними. В енергетичному секторі популярним є лінійний регресійний аналіз, який використовується для моделювання залежності між попитом на енергію, ціною та іншими факторами. Однак, багато процесів в енергетиці є нелінійними, тому для їх моделювання використовуються нелінійні алгоритми. Регресійний аналіз застосовується для прогнозування потреб в енергії, майбутнього попиту, планування стратегій ціноутворення та управління надлишковими потужностями. Множинна регресія дозволяє враховувати вплив кількох змінних на залежну змінну, що є особливо корисним в енергетичному аналізі. Важливо враховувати можливі тенденції та відхилення в даних, а також проблеми мультиколінеарності та гетероскедастичності [3].

Дані часового ряду — це послідовність спостережень, зібраних у певний час. В енергетичному секторі аналіз часових рядів використовується для прогнозування попиту та вартості енергії. В даних часових рядів є три типи динамічних змін: тренд, сезонність та цикл. Тренд — це довгостроковий рух, сезонність — регулярні коливання протягом року, а цикли — більш тривалі висхідні та низхідні рухи на ринку. Також існують випадкові короткострокові коливання. Ці зміни впливають на прийняття рішень та стратегічне планування,

особливо у фінансовій, економічній та енергетичній сферах. Прогнозування попиту на енергію використовується для оптимізації ланцюгів поставок, підвищення енергоефективності та розробки енергетичної політики. Прогнозування ціни на електроенергію є важливим для учасників енергетичного ринку. Методи часових рядів допомагають відповісти на питання "Скільки?" та "Коли?". Довший часовий ряд та точніше прогнозування зменшують ризик для інвесторів. Серед методів аналізу часових рядів виділяються ковзні середні та авторегресійні моделі. Ковзні середні використовуються для короткострокового прогнозування, а авторегресійні моделі, такі як ARIMA, — для більш складного аналізу. Використання прогнозу ковзного середнього з вагою чотирьох періодів може підвищити точність прогнозування споживання електроенергії, що допомагає в закупівлі електроенергії та зменшує ризики торгівлі енергетичними ф'ючерсами.

Застосування машинного навчання в аналітиці енергетичного сектору в останні роки набуло популярності. Великий обсяг і неоднорідність даних, наявних в енергетичному секторі, може сповільнити зусилля з управління даними та отримання значущих висновків з величезних масивів даних. Існує безліч прикладів того, як машинне навчання продемонструвало значні переваги над традиційними методами у сферах виявлення знань, класифікації, розпізнавання шаблонів та предиктивної аналітики. Під час процесу відбору ознак методи керованого або напівкерованого навчання можуть автоматично фільтрувати і скорочувати дані залежно від контексту [4].

Контрольоване навчання використовує мічені дані для навчання моделі, яка потім може передбачати результати для нових даних. Прикладами завдань контрольованого навчання є класифікація та регресія. В енергетиці контрольоване навчання використовується для прогнозного технічного обслуговування та прогнозування попиту. Неконтрольоване навчання використовує немічені дані для виявлення прихованих структур та закономірностей. Прикладами завдань неконтрольованого навчання є кластеризація та виявлення аномалій. В енергетиці неконтрольоване навчання використовується для виявлення аномалій в

електромережі та прогнозування збоїв. Для деяких завдань використовуються рекурентні нейронні мережі, які враховують часову динаміку даних. Методи глибокого навчання використовуються для довгострокового прогнозування профілів навантаження, цін на електроенергію та станів енергетичної системи. Важливо перевіряти точність моделей за допомогою зовнішніх даних та враховувати невизначеність модельних рішень. Для статичних навантажень використовуються методи класифікації для сегментації реакції попиту та оцінки поведінки відключень [4].

Навчання під наглядом — це підхід до машинного навчання, при якому модель навчається на прикладах з мітками, що включають вхідні ознаки та цільовий вихід. Це дозволяє моделі робити прогнози для нових даних. Прогнози можуть бути категоричними (класифікація) або числовими (регресія). В енергетичному секторі навчання під наглядом використовується для прогнозування споживання енергії, покращення розподілу енергоресурсів, оптимізації заміни обладнання, управління джерелами та зберіганням енергії. Серед алгоритмів навчання під наглядом виділяються лінійна регресія, логістична регресія, дерева рішень, Наївний Байєс, k -найближчих сусідів та машина опорних векторів. Слід зазначити, що існують більш складні алгоритми, які можуть забезпечити кращі результати в залежності від конкретної задачі.

На відміну від навчання під наглядом, навчання без нагляду працює з неміченими даними, тобто даними без заданих цільових значень. Мета неконтрольованого навчання — виявити приховані структури, закономірності та взаємозв'язки в даних. Це особливо корисно в енергетичному секторі, де часто є великі обсяги даних, але маркування їх є складним або неможливим. Одним з найпоширеніших застосувань неконтрольованого навчання є кластеризація, яка дозволяє групувати схожі об'єкти на основі їх характеристик. Наприклад, в енергетиці кластеризація може бути використана для групування споживачів за їх моделями споживання енергії. Іншим застосуванням є виявлення аномалій, що дозволяє виявити незвичайні події або відхилення від норми, такі як збої в електромережі або шахрайство. Однак, основною проблемою неконтрольованого

навчання є суб'єктивність результатів. Інтерпретація та розуміння значення кластерів може бути складним завданням, і не існує об'єктивного критерію для визначення оптимальної кількості кластерів. Незважаючи на це, неконтрольоване навчання має значний потенціал для виявлення цінних інсайтів у даних та покращення процесів прийняття рішень в енергетичному секторі [19].

Впровадження та використання компаративної аналітики в енергетичному секторі пов'язане з певними викликами та обмеженнями. Одним з основних викликів є якість даних. Для того, щоб аналітика була ефективною, дані повинні бути точними, повними, актуальними та узгодженими. Проблеми з якістю даних можуть виникнути через помилки в зборі даних, неповну інформацію, застарілі дані та невідповідність між різними джерелами даних. Іншим викликом є інтеграція даних. В енергетичному секторі дані часто зберігаються в різних системах та форматах, що ускладнює їх інтеграцію та аналіз. Для вирішення цієї проблеми необхідно розробляти ефективні методи інтеграції даних, що дозволяють об'єднати дані з різних джерел в єдиний формат. Конфіденційність даних також є важливим аспектом, який необхідно враховувати при впровадженні компаративної аналітики. Енергетичні компанії мають доступ до великої кількості конфіденційної інформації про своїх клієнтів, і вони повинні забезпечити захист цієї інформації від несанкціонованого доступу та використання. Нестача кваліфікованих спеціалістів з аналізу даних також може бути обмеженням для впровадження компаративної аналітики. Для успішного використання аналітики компаніям потрібні фахівці з досвідом роботи з великими даними, статистичними методами та інструментами аналізу. Важливо інвестувати в навчання та розвиток персоналу, щоб забезпечити наявність необхідних компетенцій. Крім того, важливо враховувати етичні аспекти використання даних та забезпечувати прозорість аналітичних процесів. Необхідно розробляти чіткі етичні принципи та правила використання даних, щоб уникнути потенційних конфліктів та зловживань. Враховуючи ці виклики та обмеження, компанії енергетичного сектору повинні розробляти комплексні стратегії впровадження компаративної аналітики, що враховують всі аспекти, від якості даних до етичних міркувань.

1.2 Чинники впливу на економічний потенціал традиційних та відновлюваних джерел енергії.

Енергетика відіграє дуже важливу роль як у соціальному, так і в економічному розвитку країни. Загальноприйнято вважати, що існує стійкий і довготривалий зв'язок між використанням енергії та рівнем економічного і промислового зростання. Щоразу, коли беруться до уваги цілі сталого розвитку, одним із важливих пунктів у списку є енергетика. З огляду на зростаюче занепокоєння щодо екологічної та економічної стійкості, електроенергетика привертає все більшу увагу, при цьому знову акцентується увага на кліматі, майбутніх цінах на нафту і боротьбі з глобальним потеплінням, що підвищило інтерес до "зелених" або поновлюваних джерел енергії та дискусії щодо споживання енергії в майбутньому [6]. Оскільки енергетика є центральним елементом більшої частини світової економіки, мало які політичні питання є настільки ж складними, як економічні аспекти енергетики. Енергетичну економіку загалом можна визначити як вивчення попиту та пропозиції, особливо з урахуванням системної функції того, як суспільство виробляє та використовує енергію. Основними факторами доступу до енергії є вартість, ціна, регулювання та екологічні проблеми.

Всі види джерел енергії мають економічний потенціал, а фактори, що впливають на їх використання, відображаються на ступені та можливостях взаємодоповнюваності з іншими традиційними або відновлюваними джерелами енергії. Відновлювані джерела енергії є основою енергетичної системи, але вони також є одним з основних способів зменшити вплив невідновлюваних джерел енергії на навколишнє середовище, зберігаючи при цьому їхню частку в суспільних благах. Оскільки економічний розвиток часто спричиняє високий попит на енергію, а традиційні джерела енергії мають доступ до більших резервів для зниження собівартості, збільшення використання відновлюваних джерел енергії може стати дорогим задоволенням [7]. Ось чому для справедливої оцінки

цих двох видів енергії розглянуто кожен з них з точки зору впливу на суспільство і можливості заміни деяких традиційних видів енергії. Будь-який сучасний перехід на відновлювані джерела енергії повинен також враховувати можливість заміни традиційних джерел енергії, таких як ядерна енергія, на викопні види палива.

Традиційні джерела енергії, такі як вугілля, нафта та природний газ, протягом тривалого часу були основою енергетичного сектору. Їх переваги полягають у високій енергетичній щільності, відносній дешевизні (історично) та розвиненій інфраструктурі для видобутку, транспортування та використання. Ці джерела енергії сприяли індустріалізації, економічному зростанню та створенню робочих місць. Проте, їх використання пов'язане з низкою негативних наслідків для довкілля, таких як викиди парникових газів, забруднення повітря та води, а також вичерпання природних ресурсів. Крім того, ціни на викопне паливо є волатильними та залежать від геополітичної ситуації, що створює ризики для енергетичної безпеки країн. Вугілля, нафта та природний газ, видобуті з-під земної кори, є основними традиційними джерелами енергії. Уран, як джерело ядерної енергії, також відноситься до традиційних. Ці джерела є вичерпними, і їх кількість обмежена. Вугілля зіграло важливу роль в економічному розвитку західних країн, забезпечуючи енергією промисловість. Промислове зростання та економіка країни безпосередньо пов'язані з надійним та достатнім постачанням енергії, особливо твердих енергоносіїв. Легка доступність твердих енергоносіїв часто розглядається як показник економічного прогресу. Однак, постачання твердих енергоносіїв є нестабільним, а ціни на них мають тенденцію до зростання. Тривалі терміни розвідки та видобутку впливають на інвестиції як у традиційні, так і в нетрадиційні ресурси. Спалювання цих джерел призводить до викидів забруднюючих речовин та є основною причиною глобального потепління [8].

Економічна оцінка традиційних джерел енергії базується на аналізі витрат, які включають капітальні витрати на будівництво, операційні витрати, транспортні витрати, витрати на видобуток, зберігання, переробку та розподіл ресурсів. Ці витрати залежать від вартості робочої сили, технологій, матеріалів,

капіталу, регулювання та технічного обслуговування. Попит на енергію на світовому та регіональному ринках визначає ціни та витрати, впливаючи на економічний потенціал традиційних енергоресурсів. Коливання світових цін на енергоносії створюють економічні ризики для виробників. Економічна ефективність є вирішальною для забезпечення ефективних інвестицій та економічної потужності енергетики. Витрати на виробництво енергії повинні бути мінімізовані для забезпечення конкурентних переваг. Інвестиції в енергетику створюють соціальні та економічні переваги для регіону. Фактор вартості є одним з основних, що впливає на всі види джерел енергії та має враховуватися при інвестуванні в енергетику.

Доступність ресурсів є ключовим фактором, що впливає на економічний потенціал традиційних джерел енергії. Більша частина світового енергопостачання досі залежить від викопного палива, запаси якого розподілені нерівномірно по світу. Легкість та вартість доступу до цих ресурсів залежать від технологій видобутку, геологічних умов, інфраструктури та регуляторного середовища. Обмеженість запасів викопного палива та зростаюча складність їх видобутку призводять до підвищення цін та необхідності пошуку нових родовищ. При цьому важливо враховувати ціну беззбитковості видобутку, тобто ціну, за якої видобуток стає економічно вигідним. Зміна клімату та зусилля щодо скорочення викидів парникових газів можуть призвести до того, що частина запасів викопного палива залишиться невикористаною, що знижує їх економічну привабливість та впливає на інвестиційну поведінку. Враховуючи ці фактори, зростає важливість розвитку відновлюваних джерел енергії [9].

Відновлювані джерела енергії, такі як сонячна, вітрова, гідро-, геотермальна та біоенергія, пропонують альтернативу традиційним викопним видам палива. Їх основними перевагами є практично невичерпність, екологічна чистота та сприяння сталому розвитку. ВДЕ не виділяють парникових газів та не забруднюють довкілля продуктами згоряння. Технологічний прогрес знижує вартість ВДЕ, роблячи їх все більш конкурентноспроможними. Державна підтримка у вигляді субсидій, податкових пільг та інших стимулів сприяє

розвитку ВДЕ та залученню інвестицій. Створення нових робочих місць у секторі ВДЕ також є важливим соціальним та економічним фактором. Проте, ВДЕ мають і недоліки, такі як висока вартість початкових інвестицій, мінливість виробництва енергії (для сонячної та вітряної енергії) та необхідність модернізації енергетичної інфраструктури. Важливим напрямком розвитку ВДЕ є створення ефективних систем зберігання енергії, що дозволить вирішити проблему мінливості та забезпечити стабільне енергопостачання [10]. Сектор відновлюваної енергетики пропонує все більше альтернатив традиційним викопним джерелам енергії. Його значення зростає завдяки екологічним аспектам, зокрема скороченню викидів парникових газів та пом'якшенню наслідків зміни клімату. Технологічні зміни в секторі ВДЕ зумовлені очікуваними високими цінами на викопне паливо, розвитком технологій, ринковими тенденціями та зростанням інтегрованих світових енергетичних ринків. Для країн, залежних від імпорту викопного палива, ВДЕ сприяють диверсифікації енергопостачання та підвищенню енергетичної безпеки. Інвестиції у ВДЕ постійно зростають, відображаючи стурбованість станом навколишнього середовища та економічні можливості. Спостерігається глобальна конвергенція на користь ефективних та низьковуглецевих видів палива та методів виробництва енергії.

Технологічний прогрес є одним з ключових факторів, що впливають на економічну ефективність та потенціал як традиційних, так і відновлюваних джерел енергії. Інновації в технологіях видобутку, транспортування та переробки викопного палива дозволяють підвищити ефективність та знизити негативний вплив на довкілля. В секторі ВДЕ технологічний прогрес призводить до зниження вартості та підвищення ефективності сонячних панелей, вітрогенераторів та інших технологій. Розробка нових технологій зберігання енергії є важливим напрямком досліджень, який може вирішити проблему періодичності ВДЕ. "Розумні" мережі та інтелектуальні системи управління дозволяють оптимізувати розподіл енергії та підвищити ефективність енергоспоживання. Фінансування R&D є критично важливими для забезпечення сталого розвитку енергетичного сектору. Технологічні вдосконалення відбуваються як з боку пропозиції

(виробництво енергії), так і з боку попиту (споживання енергії). Постійне вдосконалення ВДЕ демонструє значний прогрес у розробці ефективніших методів виробництва, інтеграції з традиційними джерелами енергії та створення систем зберігання та доставки енергії. Ці інновації знижують витрати та підвищують конкурентоспроможність ВДЕ. Нові технології, такі як фотоелектричні панелі та вітрові турбіни, значно підвищили ефективність перетворення енергії та знизили витрати на електроенергію. Вдосконалені інтелектуальні системи дозволяють експлуатувати інтелектуальні мережі та мережі постійного струму високої напруги, оптимізуючи розподіл енергії та інтеграцію ВДЕ [11].

Інвестиційні та фінансові стратегії є ключовими компонентами, які можуть підтримати розвиток як традиційних, так і альтернативних джерел енергії. Серед ключових джерел фінансування та інвестицій можна виділити підтримку уряду на державному та місцевому рівнях, податки на виробництво та розподіл електроенергії, тепла, виробництво, транспортування та споживання палива, національні банки сприяння, приватний капітал та міжнародне фінансування. В останнє десятиліття привабливість зелених інвестицій зростає. Принципи відповідального інвестування підписали понад 2 210 установ із загальною вартістю ринка 3192,62 мільярда доларів США, які дбають та прагнуть інвестувати в більш стале майбутнє (рис. 1.1) [12]. Все більше уваги приділяється розробці механізмів, спрямованих на підтримку інвестицій і потоків капіталу в сектори з потенціалом сталої енергетики, наприклад, розробці фінансових механізмів, таких як "зелені" облігації та "зелені" кредити. Клімат зростаючих ризиків на світовому економічному ринку, а також діяльність різних кооперативів у сфері відновлюваної енергетики створюють виклики, які вже вирішуються.

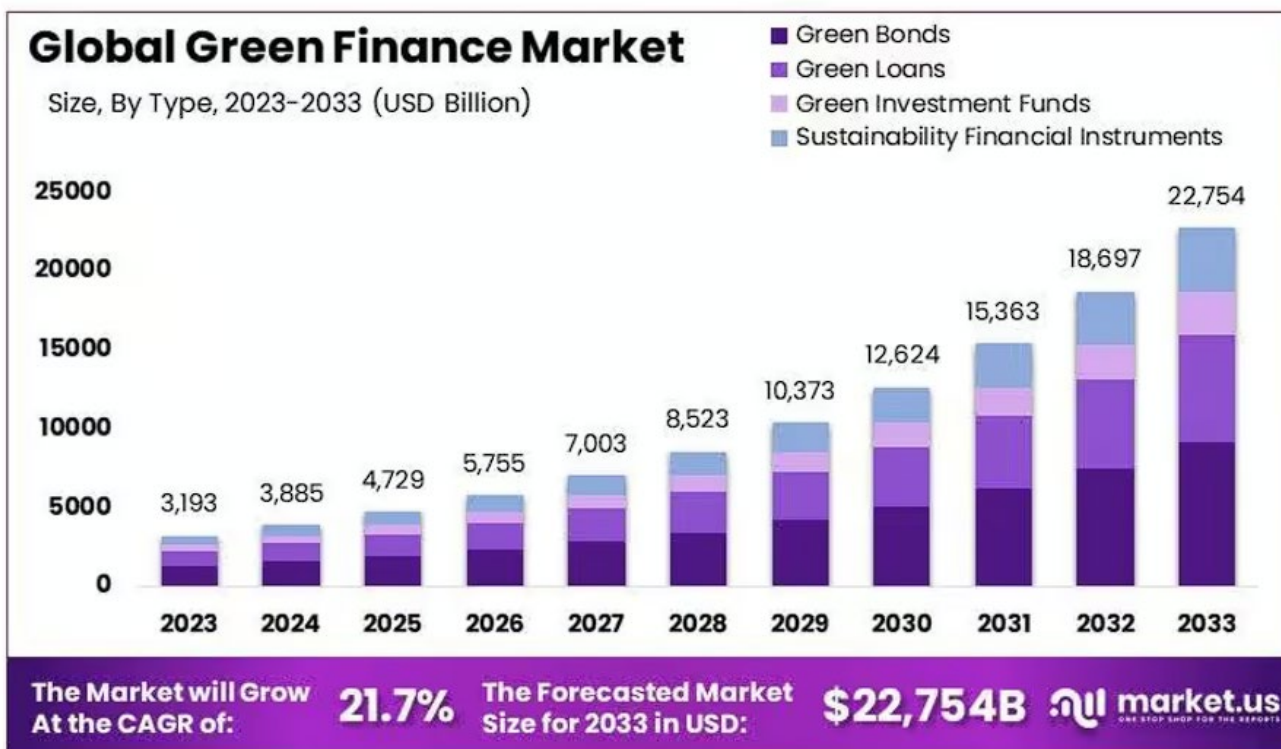


Рисунок 1.1 - Ринок глобального зеленого фінансування

Джерело: [12]

Що стосується фінансових установ, то вони також не позбавлені занепокоєння, коли йдеться про інвестиції у сталу енергетику. Серед можливих проблем - неліквідність, створення мережі конкурентів за приватну інформацію, волатильність ринку, цінова невизначеність, недостатня прозорість, регуляторна невизначеність, податкова невизначеність тощо. Для залучення необхідного фінансування важливим є імідж країни, а також довіра до уряду та наявність відповідної системи управління.

Державна політика та регулювання відіграють вирішальну роль у формуванні ринку енергії та стимулюванні розвитку як традиційних, так і відновлюваних джерел. Різні політичні інструменти, такі як "зелені" тарифи, субсидії, податкові пільги, квоти на викиди та стандарти енергоефективності, можуть впливати на економічну привабливість різних джерел енергії та спрямовувати інвестиції в певні технології. Важливо створити прозоре та стабільне регуляторне середовище, що сприятиме довгостроковим інвестиціям та передбачуваності для учасників ринку. Міжнародні угоди та співробітництво в

енергетичній сфері також впливають на національну енергетичну політику та можуть стимулювати розвиток сталої енергетики. Політика та регулювання визначають структуру ринку відновлюваної енергії. Державна підтримка є необхідною умовою для розвитку ВДЕ. Портфель інструментів зниження ризиків, таких як "зелені" тарифи, гранти, субсидії на R&D, підтримка мінімальних цін та податкові пільги, сприяє розвитку ВДЕ. Оподаткування може бути використано для підтримки розвитку різних секторів. Важливо досліджувати різні моделі політики та їх вплив на ефективність. Необхідно враховувати ключові змінні та механізми, що впливають на успіх чи невдачу кожної моделі. Діалог між владою, учасниками ринку, місцевими органами влади та фінансовими установами сприяє розробці ефективних стратегій. Важливо постійно інформувати про перспективи та невизначеності в енергетичному секторі. Прийняття ринкових рішень та розробка схем фінансування є життєво важливими для оптимізації вартості та збільшення ринкового покриття фінансових інструментів. Міжнародні обмеження та вимоги, такі як глобальні конвенції та двосторонні угоди, впливають на політичні інструменти в енергетичному секторі. Необхідно усувати бар'єри та суперечливі закони, що перешкоджають розвитку ВДЕ. Важливо розглядати ідеї, що обмежують втручання перевагами та недоліками ВДЕ та енергоефективності. Компетентні органи влади повинні проводити діалог з учасниками ринку та іншими зацікавленими сторонами для розробки ефективних стратегій. Країни-члени повинні інформувати національний орган про перспективи та невизначеності в енергетичному секторі. Прийняття ринкових рішень та розробка схем фінансування є важливими для оптимізації вартості та збільшення ринкового покриття фінансових інструментів.

Суспільство робить широкий вибір щодо енергії - яку саме енергію використовувати, де її отримати, як і для кого її використовувати та які технології застосовувати. Багато з цих рішень мають важливі соціально-економічні наслідки. Дійсно, більшість, якщо не всі аналізи енергетичних систем стверджують, що енергетичні системи існують або спроектовані не лише для того, щоб виробляти енергію для виробничого споживання, але й для того, щоб забезпечувати

різноманітні вигоди, такі як створення робочих місць, розвиток громад та вигоди для торговельного балансу. Цей вибір також не є нейтральним з точки зору розподілу, де одні отримують більше переваг, ніж інші. Наприклад, деякі громади отримують економічні вигоди у вигляді податкової бази та створення робочих місць, коли електростанції будуть розміщені на їхніх територіях, в той час як інші зіткнуться з розміщенням електростанцій, але отримують лише незначні економічні вигоди, що піднімає питання справедливості або "справедливої винагороди" [13].

Порівняльний аналіз економічного потенціалу традиційних та відновлюваних джерел енергії є важливим інструментом для прийняття рішень щодо розвитку енергетичного сектору. Враховуючи різні фактори, такі як вартість виробництва, екологічний вплив, доступність ресурсів, технологічний розвиток та соціальні наслідки, можна оцінити переваги та недоліки різних джерел енергії та визначити найбільш перспективні напрямки розвитку. Порівняльний аналіз економічного потенціалу природних енергоресурсів є важливим аспектом переходу від традиційних до відновлюваних джерел енергії. Потенційна зайнятість та мультиплікатори робочих місць є важливими економічними показниками для ВДЕ. ВДЕ можуть сприяти створенню робочих місць у сільській місцевості та для некваліфікованих працівників. Порівняння використовується для оцінки прогресу економічного зростання відповідно до розвитку енергетичних ресурсів. ВДЕ мають потенціал для створення більшої кількості робочих місць з більшим мультиплікативним ефектом, оскільки їх ланцюги постачання та попит на енергію часто є ширшими, ніж у традиційних джерел. Традиційні та відновлювані джерела енергії мають різні переваги та недоліки. Енергетичні індикатори використовуються для порівняння економічного потенціалу всіх джерел енергії, але їх поєднання надає більше доказів. Виробництво "зеленої" енергії є дорожчим, ніж традиційної. Економічне зростання пов'язане зі змінами в альтернативних витратах [14]. З виснаженням природних ресурсів очікується зростання витрат на виробництво енергії. Дослідження ВДЕ створюють можливості та виклики для економіки.

Економічний потенціал кожного виду енергоресурсів дозволяє оцінити ймовірність переходу на них та необхідні інвестиції. Зростання попиту на енергію та зміна споживчих уподобань, зокрема у бік "зеленої" генерації, передбачає більший інтерес до ВДЕ та більше можливостей для їх використання.

1.3 Теоретичні підходи компаративної аналітики енергетичного сектору

Енергія є основним ресурсом, що забезпечує життєдіяльність виробничих процесів, підвищення рівня життя суспільства та економіки в цілому. У наш час промисловий і житловий розвиток та інші споживчі звички збільшують споживання енергоресурсів. Як наслідок, споживання енергоресурсів у світі зростає з кожним роком. Високий попит на енергію призводить до використання всіх родовищ первинної енергії в різних країнах. У провідних країнах розпочався процес зменшення залежності від традиційних енергоресурсів. Сьогодні відновлювані джерела енергії використовуються з різною мотивацією. Енергетична політика урядів провідних країн світу останнім часом спрямована на забезпечення сталого розвитку провідних країн та раціональне використання енергетичних ресурсів. Сотні років людство споживає енергію, отриману з мінеральних ресурсів, що формувалися протягом мільйонів років. Однак два фактори в основному підштовхують до переходу від викопної до відновлюваної енергетики. З одного боку, відповідно до потреб населення планети, обговорюється необхідність пошуку нових джерел енергії для задоволення зростаючого попиту на енергію; з іншого боку, на перший план виходять екологічні та економічні міркування [15].

Процес отримання та споживання енергії є досить складним. Існують різні форми та джерела енергії. Енергетична галузь має структуру, яка включає виробництво, торгівлю та споживання. Під час виробництва вторинної енергії галузі виробництва енергії також виробляють певні відходи або викиди. Ці відходи мають вплив на політику навколишнього середовища та урбанізації, а

також на енергетичну галузь. Завдяки міжнародним угодам виробництво екологічно чистої енергії стає обов'язковою політикою для країн. У цьому контексті аналіз енергії з різних джерел надає перевагу для визначення енергетичної політики. Рівень індустріалізації країни та її політика визначаються кількістю спожитої енергії та інтенсивністю її використання, а також тим, який двигун використовує промисловість.

Традиційні джерела енергії.

Традиційні джерела енергії, як викопне паливо, так і ядерна енергетика, значною мірою визначають сучасний енергетичний ландшафт. Вони відіграють центральну роль у способі виробництва енергії, використовуються повсюдно і мають економічний та військовий потенціал. Завдяки своїй доступності та відносно низькій вартості вони використовуються вже понад століття. Спочатку викопне паливо започаткувало епоху раннього індустріального розвитку, а згодом дозволило перейти до капітало- та енергоємного економічного зростання. Завдяки доступності ресурсів, видобуток викопного палива продовжує зростати, незважаючи на майже експоненціальне накопичення CO₂ в атмосфері. Викопне паливо є найпоширенішим джерелом енергії у світі. Ядерна енергетика була розроблена в контексті військового конфлікту наприкінці Другої світової війни, потім адаптована до потреб споживачів як джерело електроенергії, і були побудовані атомні електростанції [16].

Традиційно у світі використовувалися і вироблялися майже виключно два види енергії - викопне паливо і деревина. Викопне паливо все ще становить більшу частину енергетичного балансу, в той час як деревина стала менш корисною. Таким чином, з точки зору потреб, перша і друга причини є ефективністю - викопне паливо є найефективнішим джерелом енергії. Доступність і кількість ресурсів відображають це, як з точки зору додаткового часу, так і з економічної точки зору. Крім того, використання і переробка природних ресурсів мають значний вплив на навколишнє середовище, особливо на клімат в контексті розглянутих джерел енергії. Загальна думка полягає в тому, що хоча викопне паливо все ще використовується і є фінансово вигідним, воно

має багато недоліків, головним чином з точки зору виснаження, сталості, впливу на навколишнє середовище, викидів і взаємозв'язку з парниковим ефектом. Водночас фахівці беруть участь у гострих дебатах на ці теми - нещодавні дискусії щодо піку видобутку нафти посилюють ці дебати. Це актуалізує питання довгострокової надійності джерел енергії, якщо ми продовжимо їх використовувати. У групі викопних видів палива нафта є найбільш значущим джерелом енергії і буде відігравати все більш важливу роль, доки її не буде трансформовано. Більшість інструментів, що потребують енергії, приводяться в дію димом; таким чином, викиди вуглекислого газу, пов'язані зі спалюванням, є значними і більш важливими в перерахунку на кДж, ніж для інших викопних видів палива.

Вугілля.

Вугілля, хоч і залишається важливим джерелом енергії в глобальному масштабі, особливо для виробництва електроенергії та в промисловості, поступово втрачає свої позиції через низку істотних недоліків. Його технологічна зрілість та доступність технологій є безперечною перевагою. Справді, технології спалювання вугілля відносно прості та добре освоєні в багатьох країнах. Це робить вугілля доступним джерелом енергії, особливо для країн з обмеженими фінансовими можливостями. Проте, саме ця технологічна простота часто пов'язана з низькою ефективністю використання ресурсу та високими викидами забруднюючих речовин [17].

Високі інвестиції, необхідні для будівництва нових вугільних електростанцій, також стримують розвиток цієї галузі. В умовах, коли відновлювані джерела енергії стають все більш конкурентними за ціною, інвестори все частіше віддають перевагу "зеленим" проектам. Високі експлуатаційні витрати, пов'язані з обслуговуванням та ремонтом вугільних електростанцій, додатково знижують їх економічну привабливість.

Найбільшим недоліком вугілля є його значний негативний вплив на довкілля. Спалювання вугілля є основною причиною викидів CO₂ в енергетичному секторі. Крім того, вугільні електростанції виділяють також інші

шкідливі речовини, такі як оксиди сірки та азоту, що забруднюють повітря та негативно впливають на здоров'я людей. Видобуток вугілля також може мати руйнівні наслідки для навколишнього середовища, зокрема, призводити до деградації земель та забруднення води[18].

Енергетична безпека країн, що залежать від імпорту вугілля, може бути під загрозою через геополітичну нестабільність та коливання цін на світовому ринку. Негативний вплив на регіональний розвиток, зумовлений забрудненням довкілля та виснаженням природних ресурсів, також є важливим фактором, що обмежує перспективи вугільної енергетики. Низький рівень суспільного "сприйняття" вугільних проєктів, пов'язаний з екологічними проблемами та ризиками для здоров'я, додатково ускладнює їх реалізацію.

Хоча світове споживання вугілля у 2023 році досягло рекордного рівня, в багатьох розвинених країнах спостерігається тенденція до його скорочення, що свідчить про поступовий перехід до більш екологічно чистих джерел енергії (рис. 1.2).

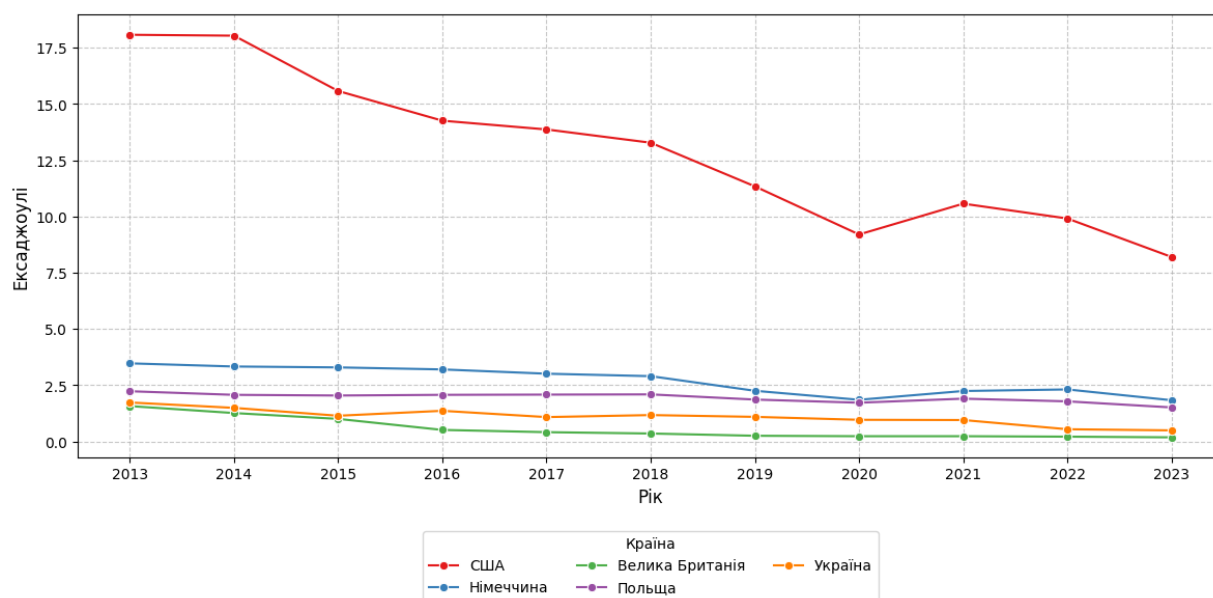


Рисунок 1.2 - Тенденції споживання вугілля, 2013-2023 рр.

Джерело: розраховано автором, на основі даних [19]

Природний газ.

Природний газ, що складається переважно з метану, є важливим джерелом енергії для багатьох країн світу. Він використовується для виробництва

електроенергії, опалення, в промисловості та як сировина для хімічної промисловості. Природний газ вважається "перехідним паливом" на шляху до низьковуглецевої енергетики, оскільки при його спалюванні виділяється менше вуглекислого газу, ніж при спалюванні вугілля чи нафти [20].

Завдяки розвиненим технологіям видобутку, транспортування (трубопроводами та у зрідженому вигляді) та використання, природний газ є відносно доступним та зручним джерелом енергії. Він відіграє важливу роль у забезпеченні стабільності енергопостачання, особливо в періоди пікового споживання.

Проте, видобуток і транспортування природного газу пов'язані з викидами метану, потужного парникового газу. Крім того, запаси природного газу, як і інших викопних палив, є обмеженими.

Європейський газовий ринок зараз перебуває у стані трансформації. Країни ЄС прагнуть зменшити залежність від імпорту газу, зокрема з Росії, та активно розвивають відновлювані джерела енергії. Споживання газу в Європі у 2023 році значно знизилося, що частково пов'язано з енергозберігаючими заходами та теплою зимою, але також відображає тенденцію до зменшення залежності від цього виду палива (рис. 1.3) [19].

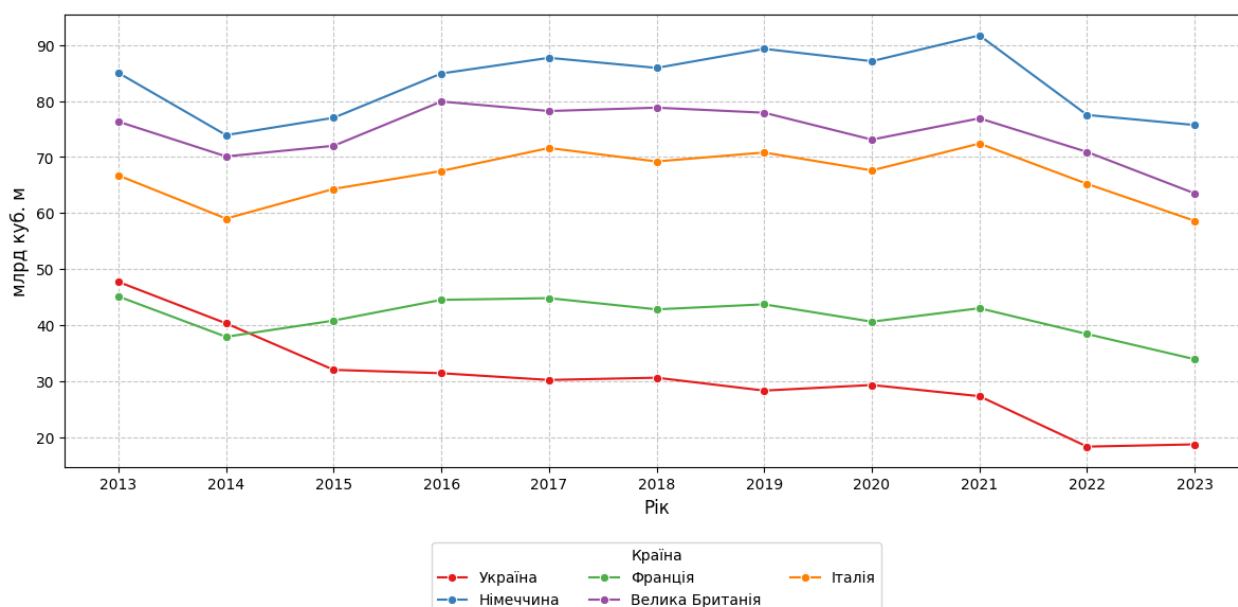


Рисунок 1.3 - Динаміка споживання природного газу, 2013-2023 рр.

Джерело: розраховано автором, на основі даних [19]

В Україні природний газ є одним з основних джерел енергії. Країна має власні, хоч і обмежені, запаси газу та є залежною від його імпорту. Війна 2022 року загострила енергетичну кризу та підкреслила важливість диверсифікації джерел постачання газу та розвитку альтернативних видів енергетики. Споживання газу в Україні у 2023 році скоротилося [20].

Ядерна енергетика.

Ядерна енергетика, заснована на процесі поділу ядер урану, є потужним, хоч і контроверсійним, джерелом енергії. Атомні електростанції (АЕС) використовують тепло, що виділяється під час керованої ланцюгової реакції поділу ядер, для нагрівання води, утворення пари та обертання турбін, які генерують електроенергію.

Однією з головних переваг ядерної енергетики є висока енергетична щільність урану та відносно низькі викиди парникових газів під час експлуатації АЕС. Це робить ядерну енергетику привабливою альтернативою викопному паливу в контексті боротьби зі зміною клімату [17].

Проте, ядерна енергетика має ряд серйозних недоліків, які обмежують її розвиток. Основні ризики пов'язані з безпекою АЕС, зокрема з можливістю аварій, таких як Чорнобильська катастрофа та аварія на Фукусімі. Проблема утилізації радіоактивних відходів, які залишаються небезпечними протягом тривалого часу, також викликає серйозне занепокоєння.

Висока вартість будівництва АЕС та тривалий термін їх спорудження також є суттєвими перешкодами. Крім того, існує ризик поширення ядерних технологій та матеріалів, які можуть бути використані для створення ядерної зброї.

За даними "Statistical Review of World Energy 2024", виробництво електроенергії на АЕС у 2023 році зросло на 2%, але залишається нижчим за рівень 2019 року [19]. Найбільшими виробниками ядерної енергії є США, Китай та Франція. В Європі виробництво ядерної енергії у 2023 році дещо знизилося, зокрема через закриття АЕС в Німеччині (рис. 1.4).

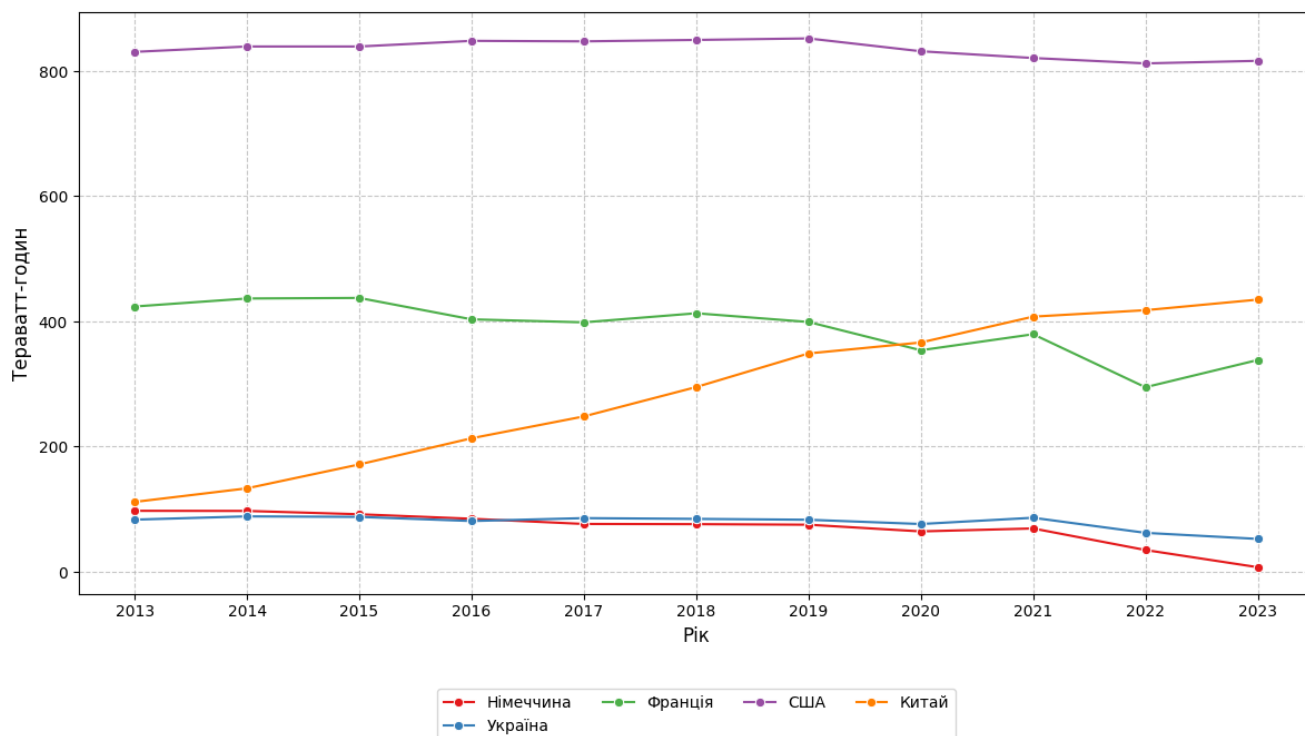


Рисунок 1.4 - Виробництво ядерної енергії, 2013-2023 рр.

Джерело: розраховано автором, на основі даних [19]

В Україні ядерна енергетика відіграє значну роль в енергетичному балансі. Кілька АЕС, зокрема Запорізька АЕС (найбільша в Європі), забезпечують значну частку виробництва електроенергії в країні. Проте, війна 2022 року та окупація Запорізької АЕС російськими військами створили серйозні ризики для ядерної безпеки України та всього світу.

Відновлювані джерела енергії.

Відновлювані джерела енергії - це ті, що використовуються для виробництва енергії, яка здатна відновлюватися після споживання. На Землі відновлюваними вважаються такі джерела енергії, як сонячне світло, підземне тепло, поверхнєве тепло, водянні потоки та енергія вітру. Серед цих видів енергії найбільш важливими є електрична енергія, енергія вітру, сонячна енергія, енергія припливів і відпливів та біогаз. Найбільш широко використовуються сонячна, вітрова та гідроелектрична енергія. Існує великий потенціал використання цих джерел енергії в багатьох частинах світу. Крім того, високі інвестиційні витрати, які значно збільшують споживання капіталу, можуть бути зменшені за рахунок використання спеціальних системних технологій, розроблених для

відновлюваних джерел. Відновлювані джерела енергії мають свої переваги та недоліки. Їхнє негайне впровадження повсюдно є тривалим. Сонячна та вітрова енергія, наприклад, є джерелами енергії, що сильно залежать від географічних та кліматичних умов. Для їх використання повинні існувати відповідні обставини, які будуть описані згодом. Зрештою, вони є перспективними з точки зору їх потенціалу для зменшення залежності від традиційних видів палива, нафти та природного газу, а також зменшують темпи забруднення навколишнього середовища. Виходячи з екологічних та технічних характеристик, відновлювані джерела енергії є кращими за традиційні джерела енергії. Останнім часом в Європейському Союзі спостерігається значне зростання вітрової, сонячної та промислової енергії. Тому відновлювані джерела енергії привертають значну увагу суспільства. Це особливо важливо для країн, які відчувають дефіцит електричної енергії, причому з різних джерел, але з огляду на те, що вона недорога, і, як наслідок, може виникнути небезпечний вплив на навколишнє середовище в конкретному регіоні. Необхідність розширення використання відновлюваних джерел енергії спонукала до проведення важливих досліджень [21]. Щодо України, то щоденні атаки із сторони Росії негативно вплинули на енергетичний сектор в цілому. Але це дає імпульс для майбутнього повоєнного відновлення енергетики із підвищеною зацікавленістю в автономних джерелах енергії, що може стати новим імпульсом для розвитку енергетики в Україні.

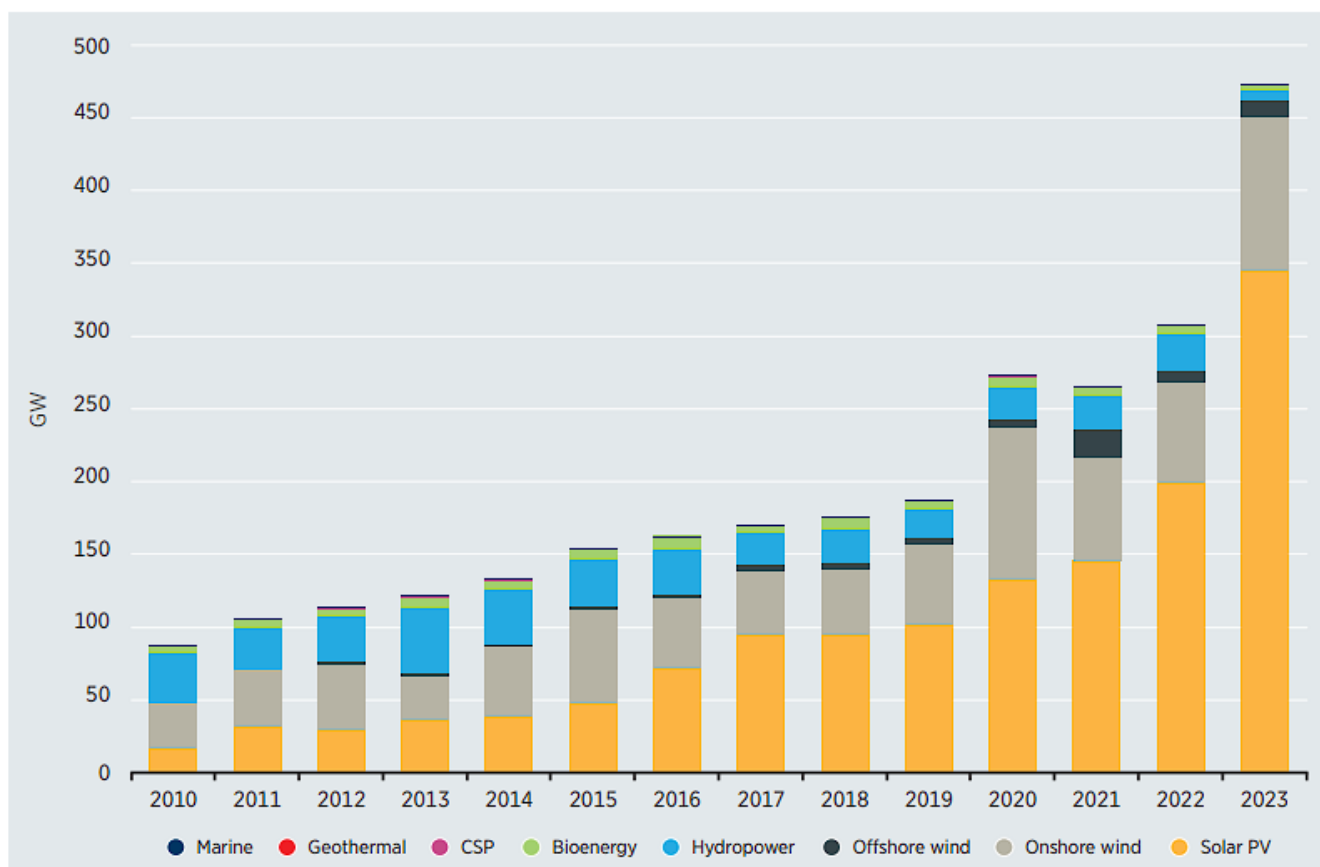
Сонячна енергія.

Сонячна енергія, що є прямим перетворенням сонячного випромінювання, на сьогодні вважається одним з найбільш перспективних напрямків розвитку відновлюваної енергетики. Технологічний прогрес та масштабне виробництво фотоелектричних панелей призвели до значного зниження їх вартості в останні роки, що зробило сонячну енергетику конкурентною з традиційними джерелами енергії в багатьох регіонах світу.

Основною технологією перетворення сонячної енергії в електричну є фотоелектричний ефект, який використовується в сонячних панелях. Концентровані сонячні електростанції (CSP) є менш поширеним, але також

перспективним напрямком, особливо для регіонів з високим рівнем сонячної радіації [22].

Останнім часом, встановлена потужність сонячної енергетики в світі продовжує стрімко зростати. У 2023 році було введено в експлуатацію рекордні 346 ГВт нових сонячних потужностей (рис. 1.5), причому 75% цього приросту забезпечив Китай. Лідерами за загальною встановленою потужністю є Китай, США та Європа [21].



Примітка. *Marine*: Морська енергетика, *Geothermal*: Геотермальна, *CSP*: Концентрована сонячна енергія (КСЕ), *Bioenergy*: Біоенергетика, *Hydropower*: Гідроенергетика *Offshore wind*: Морська вітроенергетика, *Onshore wind*: Наземна вітроенергетика, *Solar PV*: Сонячна енергетика

Рисунок 1.5 - Щорічне глобальне збільшення потужностей відновлюваної енергетики, 2010-2023 рр.

Джерело: [21]

Економічна ефективність сонячної енергетики постійно покращується. Зниження LCOE робить сонячну енергію все більш привабливою для інвесторів.

Серед переваг сонячної енергетики варто відзначити її невичерпність, екологічність (відсутність викидів парникових газів під час експлуатації), низькі експлуатаційні витрати та можливість децентралізації генерації (розміщення сонячних панелей на дахах будівель). Основним недоліком є переривчастість генерації, пов'язана із залежністю від погодних умов та часу доби. Для стабільної роботи енергосистеми з високою часткою сонячної енергетики необхідно розвивати технології зберігання енергії та "розумні" мережі [22].

В Україні сонячна енергетика має значний потенціал та активно розвивається. "Зелений" тариф, що діяв до 2030 року, був важливим стимулом для інвестицій в сонячну енергетику.

Вітроенергетика.

Вітроенергетика, що використовує кінетичну енергію вітру, є одним з найбільш розвинених та економічно ефективних видів відновлюваної енергетики. Вітрові турбіни, перетворюючи енергію вітру в електричну, стають все більш поширеними в багатьох країнах світу[23].

Сучасні вітрогенератори є високотехнологічними пристроями, здатними ефективно працювати навіть за помірної сили вітру. Розрізняють наземні та офшорні (морські) вітроелектростанції. Офшорні ВЕС мають ряд переваг, зокрема, більш стабільний та потужний вітер, але їх будівництво є дорогим та складнішим.

Згідно з даними "Statistical Review of World Energy 2024", встановлена потужність вітроенергетики у світі у 2023 році досягла нового рекорду. Було введено в експлуатацію 115 ГВт нових вітрових потужностей, з яких майже дві третини припадає на Китай. Лідерами за загальною встановленою потужністю є Китай, США та Європа [19].

Вітроенергетика характеризується відносно низьким LCOE, що робить її конкурентною з традиційними джерелами енергії.

Переваги вітроенергетики полягають в її екологічності, невичерпності та відносно низьких експлуатаційних витратах. Основні недоліки - переривчастість генерації, залежність від вітрових умов та візуальний вплив на ландшафт [24].

В Україні вітроенергетика має значний потенціал, особливо на півдні та в прибережних районах. Розвиток галузі стримується війною, нестабільністю законодавства та обмеженим доступом до фінансування.

Гідроенергетика.

Гідроенергетика, що використовує енергію річок та інших водних потоків, є одним з найстаріших та найбільш розвинених видів відновлюваної енергетики. Гідроелектростанції (ГЕС) перетворюють потенційну енергію води в кінетичну, а потім в електричну за допомогою турбін та генераторів.

ГЕС можуть бути різних типів та розмірів: від малих ГЕС, що обслуговують невеликі населені пункти, до великих греблевих ГЕС, які виробляють значну кількість електроенергії та можуть виконувати функції регулювання водного режиму річок[25].

Переваги гідроенергетики полягають у високій надійності, стабільності генерації та можливості швидкого регулювання потужності. Великі ГЕС також можуть забезпечувати накопичення води для зрошення, водопостачання та запобігання повеням.

Проте, будівництво великих ГЕС пов'язане зі значними змінами ландшафту, затопленням територій та переселенням населення. Це може мати негативний вплив на екосистеми та біорізноманіття. Крім того, ефективність ГЕС залежить від водності річок, яка може змінюватися під впливом кліматичних змін.

За даними "Statistical Review of World Energy 2024", частка гідроенергетики в глобальному виробництві електроенергії становить приблизно 16%, а в споживанні первинної енергії - 9.5%. Найбільшими виробниками гідроелектроенергії є Китай, Бразилія та Канада [19]. В Україні гідроенергетика традиційно відіграє важливу роль. На Дніпрі розташовані каскади великих ГЕС, які забезпечують значну частку виробництва електроенергії в країні. Проте, потенціал для будівництва нових великих ГЕС в Україні обмежений, і основна увага приділяється модернізації існуючих станцій та розвитку малих ГЕС.

Геотермальна енергія.

Геотермальна енергія використовує тепло Землі, що походить від розпаду

радіоактивних елементів у ядрі планети та залишкового тепла від формування Землі. Це тепло можна використовувати для виробництва електроенергії та опалення. Геотермальні електростанції (ГеоТЕС) використовують гарячу воду та пару, що видобуваються з геотермальних свердловин.

Геотермальна енергія є стабільним та надійним джерелом енергії, яке не залежить від погодних умов та часу доби. Вона також має відносно низький вплив на довкілля порівняно з викопним паливом [26].

Проте, використання геотермальної енергії обмежене географічно, оскільки вона доступна лише в районах з високою геотермальною активністю. Будівництво ГеоТЕС також може бути дорогим, особливо для глибоких свердловин.

Згідно з даними "Statistical Review of World Energy 2024", частка геотермальної енергетики в глобальному енергетичному балансі є відносно невеликою. Найбільшими виробниками геотермальної електроенергії є США, Індонезія, Філіппіни та Туреччина [19].

В Україні потенціал геотермальної енергетики поки що слабо розвинений, хоча існують перспективні регіони для її використання, зокрема, в Закарпатті.

Біоенергетика.

Енергія біомаси являє собою унікальний та найстаріший вид відновлюваної енергії, що отримується з органічної матерії рослинного або тваринного походження. Це надзвичайно перспективний напрямок у сфері альтернативної енергетики, який має глибоке коріння в природних процесах перетворення сонячної енергії. Біоенергія - це складний процес перетворення енергії, що зберігається в органічних матеріалах, через різноманітні методи: розкладання, перетравлення або ферментацію. Її відновлювана властивість виникає внаслідок унікального циклу вуглецевого синтезу в нижніх шарах атмосфери, де рослини акумулюють та зберігають сонячну енергію через фотосинтез [27].

Джерела біомаси надзвичайно різноманітні. Це можуть бути деревина, сільськогосподарські відходи, спеціально вирощені енергетичні культури, тверді побутові відходи, стічні води, промислові відходи. До енергетичних культур належать світчграс, бананова трава, солом'яне волокно, неорганічні культури, які

мають потужний потенціал для виробництва біоенергії. Технологічні процеси переробки біомаси включають цілий спектр методів: спалювання, газифікацію, піроліз, анаеробне бродіння. Кожен з цих методів має свої особливості та переваги залежно від виду сировини та кінцевої мети перетворення енергії.

Принципова перевага біомаси полягає в її вуглецевій нейтральності. На відміну від традиційного викопного палива, спалювання біомаси не призводить до збільшення загальної кількості вуглекислого газу в атмосфері. Вуглець, що виділяється під час спалювання, попередньо поглинається рослинами під час їхнього росту, забезпечуючи гармонійний екологічний баланс.

Використання біомаси має низку важливих переваг для економіки та екології. Принципова перевага біомаси полягає в її вуглецевій нейтральності. На відміну від традиційного викопного палива, спалювання біомаси не призводить до збільшення загальної кількості вуглекислого газу в атмосфері. Вуглець, що виділяється під час спалювання, попередньо поглинається рослинами під час їхнього росту, забезпечуючи гармонійний екологічний баланс. По-друге, розвиток біоенергетики стимулює сільське господарство, створює нові робочі місця та сприяє розвитку сільських територій. Ну і звичайно, це відновлюване джерело енергії, яке дозволяє зменшити залежність від викопного палива [28].

Однак технологія не позбавлена певних викликів та обмежень. Спалювання біомаси може виділяти парникові гази, хоча й у значно менших обсягах, ніж traditional викопні джерела. Вирощування енергетичних культур створює потенційну конкуренцію продовольчому виробництву та може призводити до виснаження ґрунтів. Залежність від лісової деревини як сировини для біомаси породжує серйозні екологічні проблеми. Тому науковці та дослідники активно працюють над розвитком нових енергетичних культур, які б мінімізували негативний вплив на навколишнє середовище.

Органічне сільське господарство дедалі активніше інтегрується в енергетичний сектор, намагаючись мінімізувати вплив виробництва та використання біоенергії на різні екосистеми. Важливим є баланс між економічною ефективністю та екологічною безпекою.

За даними "Statistical Review of World Energy 2024", світове виробництво біопалива у 2023 році зросло на вражаючі 8%. Беззаперечними лідерами виробництва є США, Бразилія та країни Європейського Союзу [19]. Ці держави демонструють успішні приклади впровадження біоенергетичних технологій. В Україні біомаса має колосальний потенціал, передусім завдяки багатим ресурсам сільськогосподарських відходів та розвиненому лісовому господарству. Вітчизняні науковці та аграрії дедалі більше уваги приділяють вивченню та впровадженню біоенергетичних технологій.

Майбутнє біоенергетики пов'язане з постійним технологічним вдосконаленням, розширенням спектра енергетичних культур, пошуком нових ефективних методів перетворення органічної речовини на корисну енергію. Важливим є дотримання балансу між економічною доцільністю, технологічною інновативністю та турботою про навколишнє середовище.

Висновки до першого розділу

Компаративна аналітика в енергетичному секторі відіграє ключову роль у вирішенні сучасних викликів сталого розвитку. Цей підхід дозволяє враховувати широкий спектр факторів — від економічних до екологічних та соціальних — у процесі порівняння традиційних і відновлюваних джерел енергії. Вона забезпечує систематичне зіставлення технологічних, фінансових і екологічних характеристик різних джерел енергії, що допомагає визначати оптимальні напрями інвестицій та енергетичних реформ. Використання сучасних методів, таких як багатокритеріальний аналіз, дозволяє інтегрувати великі обсяги даних для всебічної оцінки.

Теоретичні засади компаративної аналітики включають використання багатофакторних моделей, які враховують економічні, соціальні та екологічні параметри. У дослідженні наголошується на важливості інтеграції великих даних і застосування машинного навчання для побудови ефективних аналітичних моделей. Це дозволяє підвищити точність прогнозів і врахувати специфічні

аспекти енергетичних систем, включаючи циклічність виробництва ВДЕ.

Ключовими чинниками, що впливають на потенціал відновлюваних джерел, є державна підтримка, інновації у сфері зберігання енергії та розвиток "розумних" мереж. Попри високу вартість початкових інвестицій, подальше зниження витрат на технології ВДЕ (відновлюваних джерел енергії) робить їх привабливими для інвесторів. Важливо також враховувати регіональні особливості, зокрема кліматичні умови та доступність природних ресурсів.

Енергетична політика багатьох країн орієнтується на зменшення залежності від викопного палива, підвищення енергоефективності та сприяння відновлюваним джерелам енергії, що обґрунтовує необхідність застосування таких підходів. Зокрема, методи порівняння сприяють адаптації енергетичного сектору до сучасних викликів глобалізації, зміни клімату та зростаючого попиту на енергію, зазначених у дослідженні.

Економічний потенціал традиційних джерел енергії, таких як вугілля, нафта і газ, значною мірою обумовлений їх доступністю, енергетичною щільністю та розвиненою інфраструктурою. Однак негативний вплив на довкілля та обмеженість ресурсів ставлять під сумнів їхню довгострокову економічну доцільність. Натомість відновлювані джерела, такі як сонячна, вітрова та гідроенергія, пропонують альтернативу, знижуючи викиди парникових газів і сприяючи сталому розвитку.

2 ЕКОНОМІЧНА АНАЛІТИКА ДЖЕРЕЛ ЕНЕРГІЇ: ДІАГНОСТИКА ТА АНАЛІТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

2.1 Аналіз та оцінювання сучасного стану енергетичного сектору

Енергетичний сектор має критично важливе значення для розвитку економіки та забезпечення енергетичної безпеки країн світу, привертаючи увагу урядів, дослідницьких організацій та бізнесу. Зростаюче споживання енергії, особливо з традиційних джерел, викликає серйозні екологічні проблеми, що підтверджується даними рисунками 2.1 та 2.2, які фіксують рекордні рівні споживання викопного палива та викидів парникових газів у 2023 році. У ЄС стратегія сталого розвитку передбачає підвищення енергоефективності, раціональне використання ресурсів та перехід до відновлюваних джерел енергії для покращення якості життя та зменшення негативного впливу на довкілля.

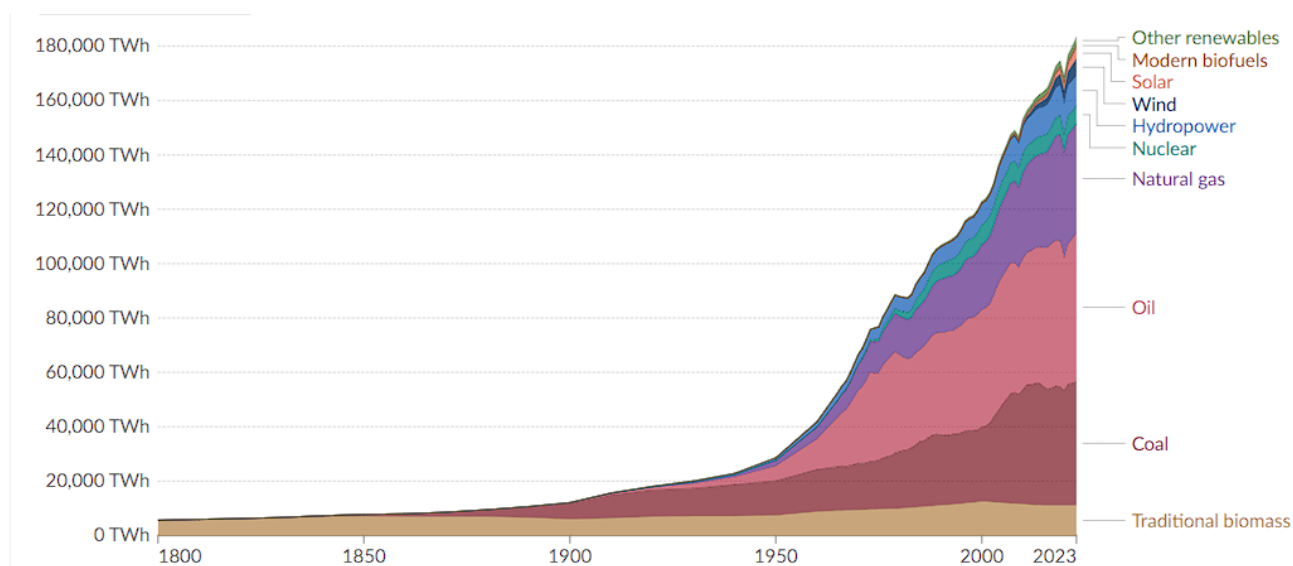


Рисунок 2.1 - Світове споживання первинної енергії за джерелами

Джерело: [29]

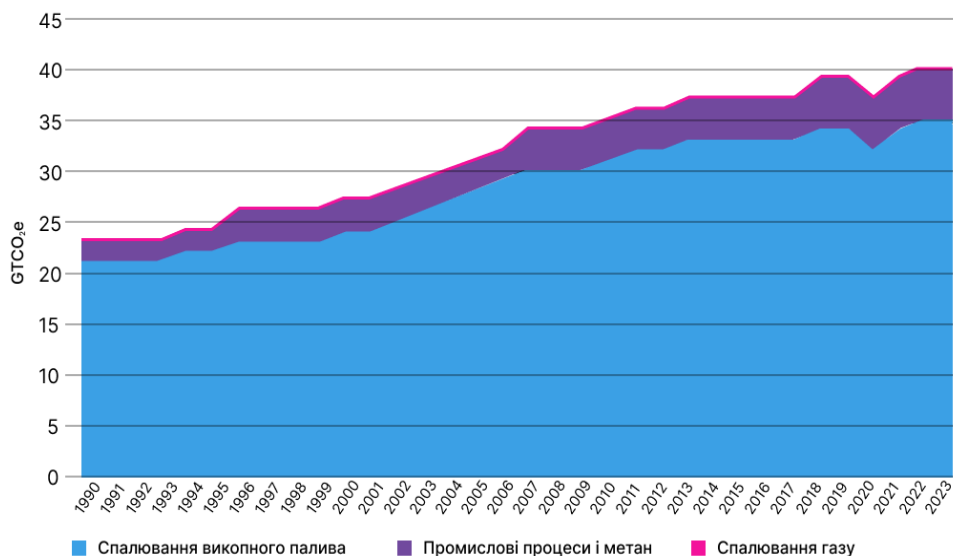


Рисунок 2.2 - Динаміка викидів парникових газів

Джерело: [19]

На початку 19 століття енергетичний ландшафт світу виглядав різночленим інакше від сучасного. Понад 95% енергії отримували з біологічних джерел - переважно це була м'язова сила людей і тварин, що тягнули плуги, крутили жорна та приводили в рух примітивні механізми. Дерево, як основне паливо, забезпечувало тепло та можливість готувати їжу. Однак цей традиційний уклад мав кардинально змінитися з приходом промислової революції[30].

Перша половина 19 століття започаткувала докорінні зміни в енергетичній парадигмі. Відкриття багатих вугільних родовищ, особливо у Великій Британії та Німеччині, спричинило справжній прорив у промисловості (див. рис. 2.1). Вугілля стало рушієм індустріальної епохи, живлячи парові машини та доменні печі. Особливо важливим стало використання німецького антрациту для розвитку чорної металургії, що заклало фундамент сучасної промисловості. Проте справжня енергетична революція була ще попереду.

1859 рік став переломним моментом з відкриттям першої комерційної нафтової свердловини в Пенсільванії. Це відкриття, поєднане з винаходом двигуна внутрішнього згоряння, не просто змінило транспортну галузь - воно трансформувало все суспільство. Перші автомобілі та вантажівки, що з'явилися в останній чверті 19 століття, започаткували нову еру мобільності, а разом з нею - і

нові виклики для енергетичного сектору (див. рис. 2.1).

У наступний період, з 1800 по 1965 роки, енергетичний баланс продовжував змінюватися. Хоча вугілля все ще домінувало, забезпечуючи 30-50% загального споживання енергії, нафта поступово набирала все більшої ваги (див. рис. 2.1). Її споживання зростало вдвічі швидше за світову економіку, що свідчило про формування нової енергетичної парадигми. Ця тенденція тривала до 1970-х років, коли світ зіткнувся з першими серйозними енергетичними кризами [29].

Саме ці кризи змусили людство переосмислити свій підхід до енергетики. Країни почали активно досліджувати альтернативні джерела енергії, розвивати ядерну енергетику та експериментувати з відновлюваними джерелами (рис. 2.3 та 2.4). Паралельно розвивалася і геотермальна енергетика, яка пройшла шлях від простого використання гарячих джерел до сучасних електростанцій. Цей період також ознаменувався важливими науковими проривами в розумінні електромагнетизму, започаткованими ще експериментами Фарадея у 1821 році [30].

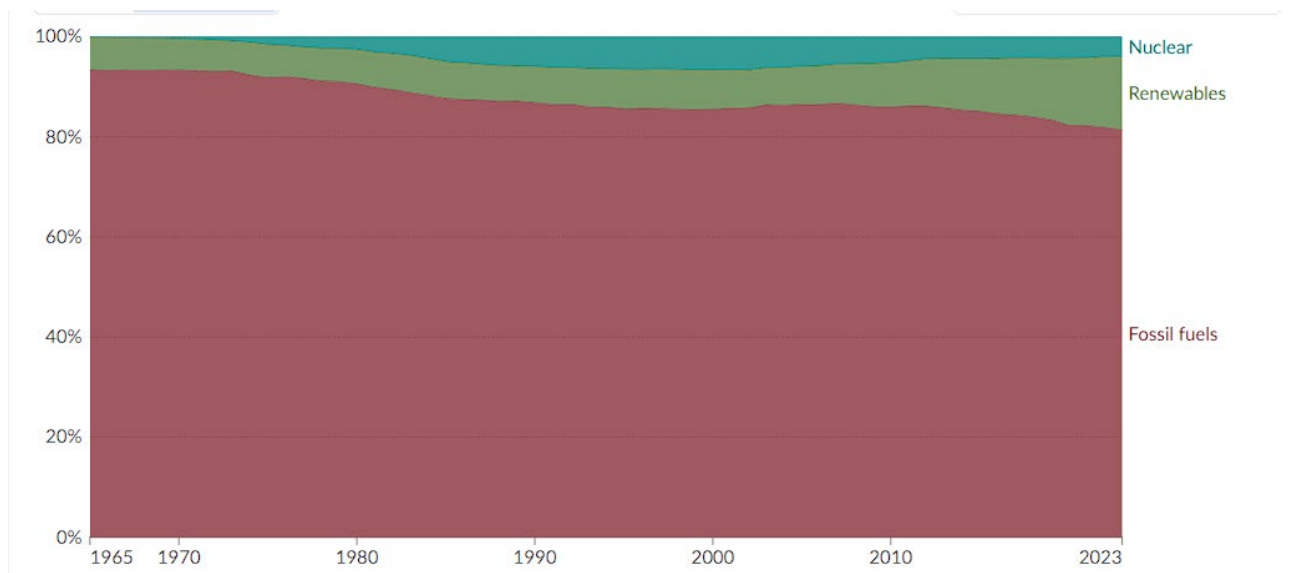


Рисунок 2.3 - Споживання первинної енергії з викопних видів палива, ядерної та відновлюваної енергетики

Джерело: [29]

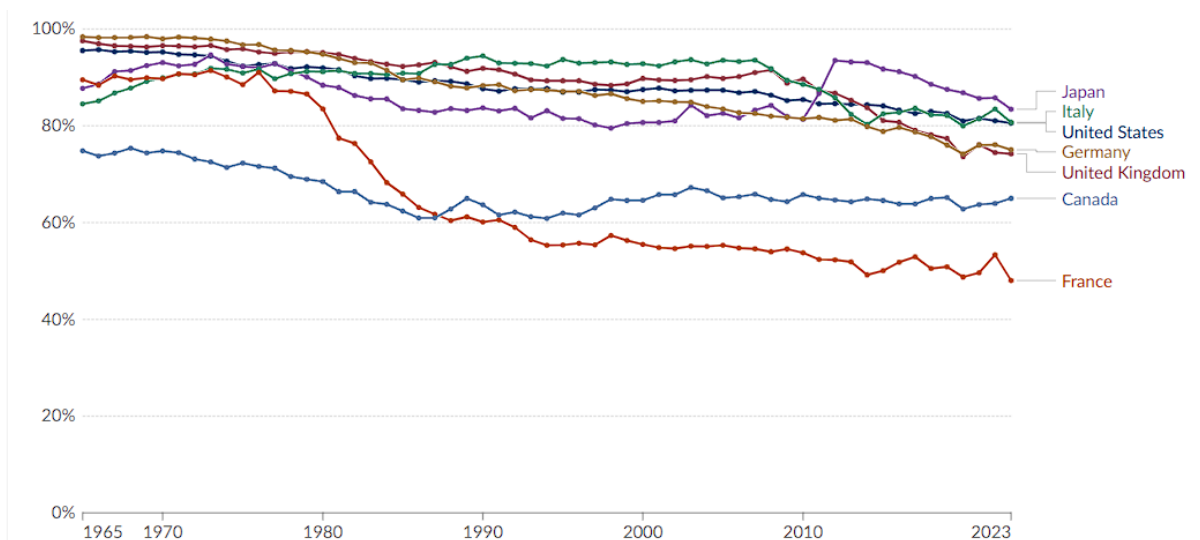


Рисунок 2.4 – Частка споживання первинної енергії з викопного палива

Джерело: [29]

Розвиток енергетики та промисловості, особливо за рахунок використання викопного палива, спричинив зростання викидів парникових газів та глобальне потепління. Особливо стрімке збільшення концентрації CO₂ в атмосфері спостерігається з середини 20 століття. Промислова революція, яка здавалася тріумфом людського прогресу, заклала фундамент сучасної екологічної кризи. Якщо в 1950 році глобальні викиди CO₂ становили близько 6 гігатонн на рік, то вже у 2023 році викиди CO₂ від енергетики досягли рекордного рівня і вперше перевищили 40 GtCO_{2e} (див. рис. 2.2). Паралельно з цим середньорічна глобальна температура підвищилася майже на градус Цельсія, що має катастрофічні наслідки для світових екосистем.

Як зазначено в численних дослідженнях, ключовою проблемою, пов'язаною зі спалюванням викопного палива, є викиди сполук вуглецю, які сприяють посиленню парникового ефекту та зміні клімату. Основним джерелом цих викидів є вуглекислий газ (CO₂), що утворюється при спалюванні вугілля, нафти та газу. Проте важливо враховувати також викиди метану (CH₄) та оксиду азоту (N₂O), які є ще більш потужними парниковими газами, ніж CO₂. Для комплексної оцінки впливу на клімат ці гази перераховують на еквівалент CO₂ (CO_{2e}) [31].

Згідно з даними "Statistical Review of World Energy 2024", викиди CO₂ від спалювання викопних палив у 2023 році досягли рекордного рівня 35129,8 млн

тонн (див. рис. 2.2). Найбільшими джерелами викидів CO₂ стали Азія, Північна Америка та Європа (рис 2.5). Викиди від спалювання газу становлять найбільшу частку викидів CO₂ від викопного палива (87%), а викиди від промислових процесів та спалювання - решту (13%). Як зазначається в "The Role of Artificial Intelligence in Decarbonization", з 1750 по 2011 рік частка викидів вуглекислого газу становила близько сімдесяти восьми відсотків. Для порівняння, у 1950 році глобальні викиди CO₂ становили близько 6 гігатонн, а в 2020 - близько 34 гігатонн [32]. Ці дані свідчать про різке зростання викидів CO₂ протягом останніх десятиліть. Також варто врахувати викиди від спалювання попутного газу, які також роблять внесок у загальний обсяг викидів сполук, що містять вуглець. Крім того, надмірне навантаження на природні поглиначі вуглецю, такі як ліси та океани, ускладнює проблему та вимагає негайних дій для скорочення викидів [33].

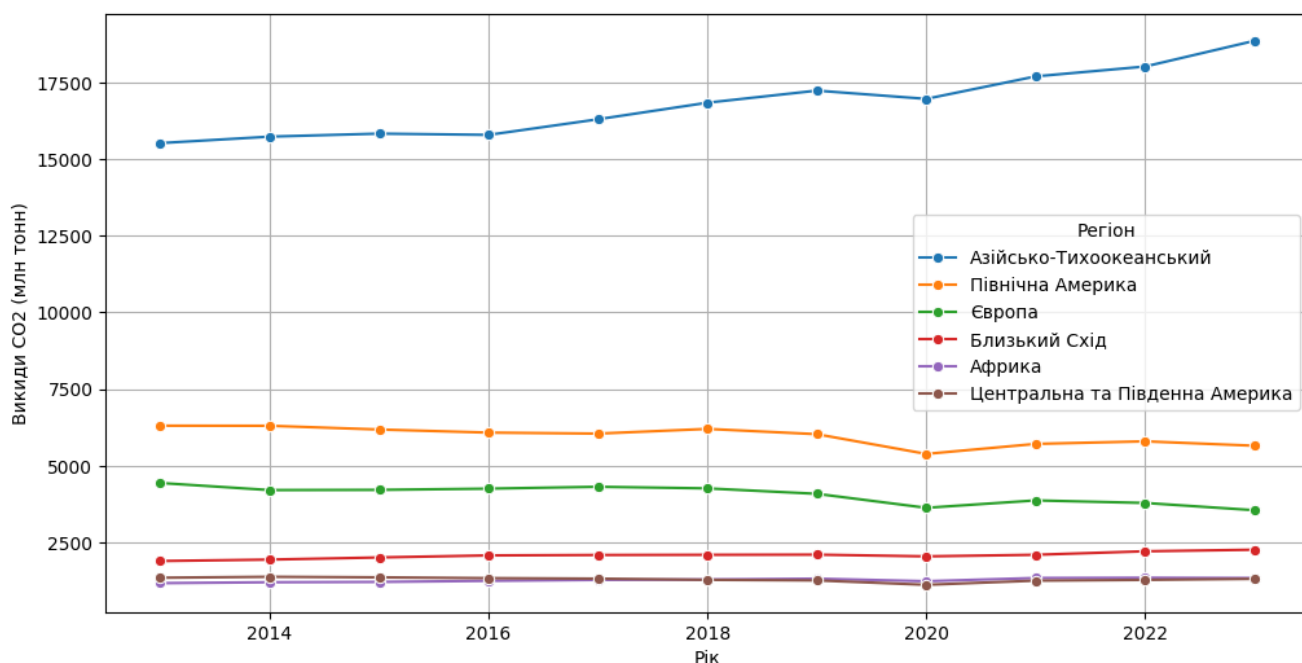


Рисунок 2.5 - Динаміка викидів CO₂ по регіонам, 2013-2023 рр.

Джерело: складено автором на основі даних [2]

Забруднення повітря стало особливо гострою проблемою в промислових регіонах та мегаполісах. У багатьох містах Азії концентрація дрібнодисперсних частинок (PM_{2.5}) регулярно перевищує безпечні норми в 5-10 разів. Ці мікроскопічні частинки, що утворюються переважно при спалюванні викопного

палива, проникають глибоко в легені та кровоносну систему, викликаючи серйозні захворювання.

Водні ресурси також зазнали значного впливу. Теплові електростанції не лише споживають величезні обсяги води для охолодження, але й повертають її в природні водойми з підвищеною температурою, що порушує місцеві екосистеми. Кислотні дощі, спричинені викидами оксидів сірки та азоту від спалювання вугілля, продовжують завдавати шкоди лісам, озерам та сільськогосподарським угіддям. Особливу тривогу викликає стан Світового океану. Підвищення рівня CO₂ в атмосфері призводить до закислення океанічних вод, що загрожує існуванню коралових рифів та багатьох морських організмів. За останні 200 років кислотність океану зросла на 30%, і цей процес продовжує прискорюватися [19].

Масштаби екологічних змін стали настільки значними, що науковці говорять про початок нової геологічної епохи – антропоцену, де людська діяльність стала головним фактором, що впливає на екосистему Землі. І центральну роль у цих змінах відіграє саме енергетичний сектор, зокрема використання викопного палива.

Вугілля, нафта та природний газ, як традиційні джерела енергії, відіграють значну роль в енергетичному балансі багатьох країн і є одним з основних джерел викидів парникових газів. Вугілля, зокрема, широко застосовується для виробництва електроенергії та в промисловості, що впливає як на екологічну ситуацію, так і на економічні показники та рівень енергетичної залежності. В Європі спостерігається суттєва різниця в рівнях споживання вугілля. Згідно з даними (рис. 2.6 та див. рис. 1.2), у 2023 році найбільшим споживачем вугілля в Європі була Польща (4,12 ЕДж), за нею йшли Німеччина (1,83 ЕДж) та Туреччина (1,65 ЕДж). Для порівняння, споживання вугілля в Україні становило 0,49 ЕДж, що значно менше, ніж у лідерів. Також варто відзначити значне скорочення споживання вугілля у Франції (0,18 ЕДж) та Італії (0,22 ЕДж) у 2023 році [19].


Coal Consumption*

Exajoules												Growth rate per annum		Share
	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2023	2013–23	2023
Austria	0.14	0.13	0.14	0.13	0.13	0.12	0.12	0.10	0.11	0.10	0.10	-6.6%	-3.5%	0.1%
Belgium	0.15	0.14	0.14	0.13	0.13	0.13	0.13	0.10	0.11	0.12	0.10	-14.9%	-3.9%	0.1%
Bulgaria	0.25	0.27	0.27	0.24	0.26	0.23	0.21	0.17	0.22	0.26	0.16	-38.7%	-4.3%	0.1%
Croatia	0.03	0.03	0.03	0.03	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.01	-17.4%	-6.7%	†
Cyprus	^	^	^	^	^	^	^	^	^	^	^	-9.0%	60.9%	†
Czech Republic	0.71	0.69	0.68	0.69	0.67	0.67	0.60	0.52	0.54	0.56	0.47	-15.3%	-4.0%	0.3%
Denmark	0.14	0.11	0.08	0.09	0.07	0.07	0.04	0.03	0.04	0.04	0.03	-33.6%	-14.2%	†
Estonia	0.17	0.17	0.15	0.16	0.18	0.18	0.13	0.10	0.11	0.12	0.10	-19.7%	-5.5%	0.1%
Finland	0.21	0.19	0.16	0.18	0.17	0.18	0.15	0.11	0.12	0.12	0.09	-26.1%	-8.2%	0.1%
France	0.53	0.39	0.37	0.36	0.39	0.36	0.29	0.20	0.27	0.23	0.18	-23.3%	-10.3%	0.1%
Germany	3.47	3.33	3.29	3.20	3.01	2.90	2.25	1.85	2.24	2.31	1.83	-21.0%	-6.2%	1.1%
Greece	0.29	0.28	0.24	0.18	0.20	0.20	0.13	0.08	0.07	0.07	0.05	-28.3%	-16.6%	†
Hungary	0.10	0.09	0.10	0.09	0.09	0.09	0.08	0.07	0.06	0.05	0.04	-30.2%	-9.2%	†
Iceland	^	^	^	^	^	^	^	^	^	^	^	-28.1%	-2.7%	†
Ireland	0.09	0.08	0.09	0.09	0.08	0.06	0.04	0.04	0.05	0.04	0.03	-31.7%	-10.8%	†
Italy	0.57	0.55	0.52	0.46	0.40	0.37	0.28	0.21	0.23	0.31	0.22	-30.3%	-9.1%	0.1%
Latvia	^	^	^	^	^	^	^	^	^	^	^	-45.4%	-20.1%	†
Lithuania	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	^	-38.7%	-8.3%	†
Luxembourg	^	^	^	^	^	^	^	^	^	^	^	-18.5%	-3.5%	†
Netherlands	0.34	0.38	0.46	0.43	0.39	0.35	0.27	0.17	0.23	0.23	0.16	-31.6%	-7.4%	0.1%
North Macedonia	0.05	0.05	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.03	0.03	0.04	0.04	5.5%	-2.7%	†
Norway	0.03	0.04	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.04	0.03	0.03	2.7%	0.7%	†
Poland	2.23	2.07	2.04	2.07	2.08	2.09	1.86	1.72	1.90	1.78	1.51	-15.6%	-3.8%	0.9%
Portugal	0.11	0.11	0.14	0.12	0.14	0.11	0.05	0.02	0.01	^	^	-28.6%	-46.6%	†
Romania	0.25	0.24	0.25	0.22	0.23	0.21	0.21	0.15	0.17	0.15	0.11	-24.5%	-7.4%	0.1%
Slovakia	0.14	0.14	0.14	0.13	0.14	0.14	0.11	0.10	0.12	0.10	0.10	-4.5%	-3.9%	0.1%
Slovenia	0.06	0.04	0.04	0.05	0.05	0.05	0.04	0.04	0.04	0.03	0.03	-8.5%	-6.4%	†
Spain	0.48	0.49	0.57	0.44	0.56	0.48	0.21	0.12	0.13	0.16	0.12	-24.2%	-13.0%	0.1%
Sweden	0.09	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08	0.07	0.07	0.07	0.07	-1.8%	-2.9%	†
Switzerland	0.01	0.01	0.01	^	^	^	^	^	^	^	^	-	-3.6%	†
Türkiye	1.32	1.51	1.45	1.61	1.65	1.71	1.76	1.70	1.74	1.76	1.65	-6.3%	2.3%	1.0%
Ukraine	1.73	1.49	1.14	1.36	1.08	1.17	1.09	0.96	0.95	0.54	0.49	-10.5%	-11.9%	0.3%
United Kingdom	1.57	1.26	1.00	0.51	0.41	0.35	0.25	0.23	0.23	0.21	0.18	-12.6%	-19.3%	0.1%
Other Europe	0.61	0.50	0.58	0.60	0.59	0.59	0.57	0.59	0.56	0.54	0.51	-5.6%	-1.7%	0.3%
Total Europe	15.86	14.88	14.24	13.74	13.29	12.98	11.06	9.57	10.44	10.02	8.39	-16.2%	-6.1%	5.1%

Рисунок 2.6 – Статистичні дані споживання вугілля країн Європи, 2013–2023 рр.

Джерело: [19]

Ці дані свідчать не лише про різні підходи європейських країн до використання вугілля, але й про різний ступінь їх економічного розвитку та доступ до альтернативних джерел енергії. Наприклад, Франція та Італія, які демонструють значне скорочення споживання вугілля, одночасно збільшили частку ядерної та відновлюваної енергії в своєму енергетичному балансі. У той же час, Польща, яка залишається найбільшим споживачем вугілля в Європі, має відносно низьку частку ВДЕ (рис. 2.7). Це репрезентує тенденцію, що країни, які активно скорочують використання вугілля, часто роблять це завдяки розвитку альтернативних джерел енергії, тоді як країни з високою залежністю від вугілля стикаються з більшими викликами в процесі енергетичного переходу.

Нафта залишається ключовим енергоресурсом, хоча її роль у виробництві електроенергії поступово зменшується, поступаючись місцем газу та ВДЕ. Основна сфера застосування нафти - транспортний сектор, який залишається значною мірою залежним від цього виду палива. Більшість європейських країн є чистими імпортерами нафти, що робить їх вразливими до коливань цін та

геополітичних ризиків [34]. Найбільші доведені запаси нафти знаходяться в країнах Близького Сходу, що підкреслює стратегічну важливість цього регіону для глобальної енергетичної безпеки. У 2023 році світове споживання нафти досягло рекордного рівня - понад 100 млн барелів на добу, що свідчить про збереження високого попиту на цей енергоресурс. Європа, зі своєю обмеженою власною виробництвом нафти (3,2 млн барелів на добу у 2023 році) та високим споживанням (13,9 млн барелів на добу), стикається з необхідністю диверсифікації джерел енергії та підвищення енергоефективності. Скорочення видобутку нафти в деяких європейських країнах, зокрема в Норвегії, ще більше актуалізує цю необхідність (рис. 2.7).

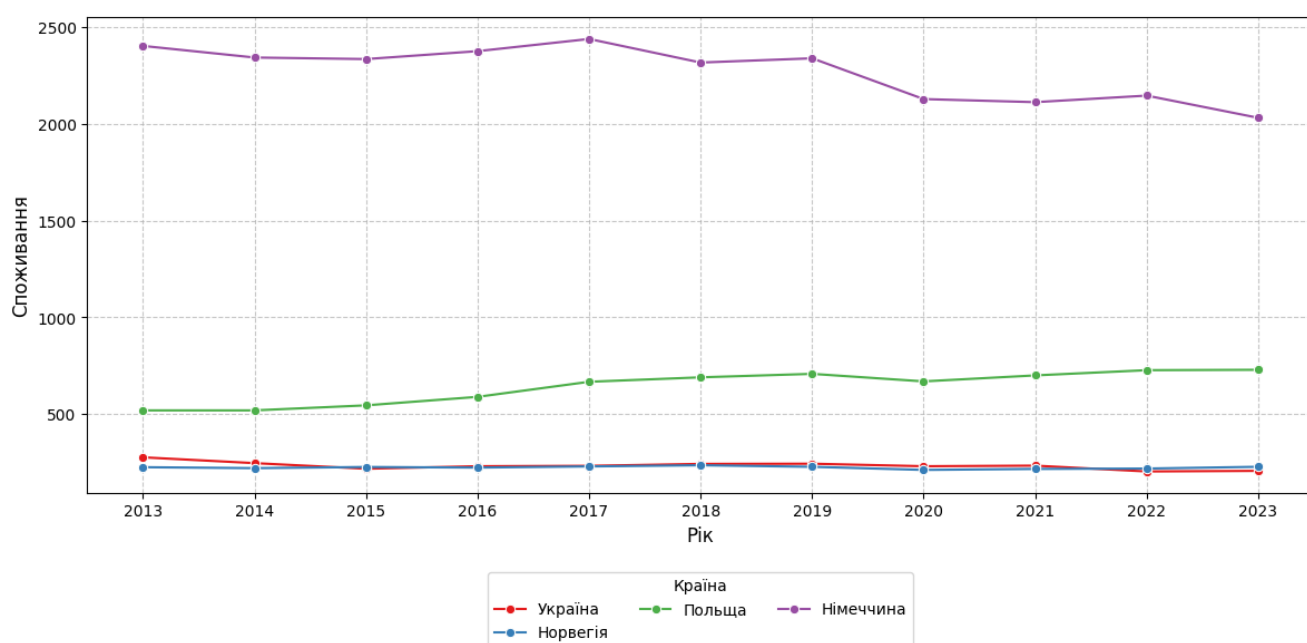


Рисунок 2.7 - Тенденції споживання нафти, 2013 -2023 рр.

Джерело: складено автором на основі даних [19]

Природний газ став одним з найважливіших енергетичних ресурсів, особливо для європейського регіону, де він широко використовується для виробництва електроенергії та опалення. Порівняно з вугіллям та нафтою, природний газ вважається більш екологічно чистим паливом, оскільки при його згорянні виділяється приблизно вдвічі менше вуглекислого газу. Проте його видобуток та транспортування пов'язані зі значними викидами метану, який є потужним парниковим газом [19].

Європейський газовий ринок переживає період суттєвої трансформації. У 2023 році споживання газу в Європі знизилося на 7% до найнижчого рівня з 1994 року, що пов'язано зі зусиллями країн ЄС щодо диверсифікації джерел енергії та зменшення залежності від російського газу. Країни ЄС активно інвестують у розвиток відновлюваних джерел енергії та водневих технологій, розглядаючи природний газ як "перехідне паливо" на шляху до вуглецевої нейтральності. Довгострокова стратегія передбачає, що до 2030 року частка природного газу в енергетичному балансі ЄС почне поступово знижуватися, хоча він ще тривалий час відіграватиме важливу роль у забезпеченні стабільності енергосистем з високою часткою відновлюваної генерації.

У 2023 році частка викопних палив у світовому споживанні первинної енергії становила 81,5%. Попри домінування традиційних джерел, спостерігається зростання частки відновлюваних джерел енергії (рис. 2.8). Європейські країни активно розвивають ВДЕ, але глобальний перехід до низьковуглецевої енергетики відбувається повільно. Розвиток технологій зберігання енергії, водневої енергетики та дослідження в галузі термоядерного синтезу мають потенціал прискорити цей перехід. Сучасні технології та усвідомлення кліматичних викликів сприяють формуванню нової енергетичної реальності, що ґрунтується на диверсифікації джерел енергії та зменшенні залежності від викопного палива [21].

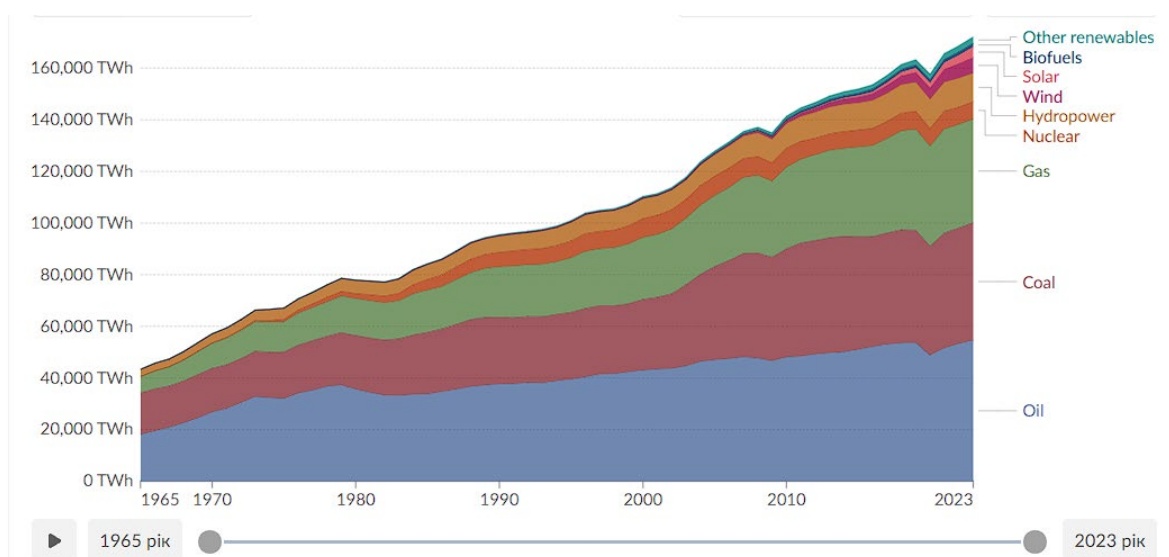


Рисунок 2.8 – Споживання енергії за джерелами енергії, світ

Джерело: [29]

Зростаюче усвідомлення необхідності боротьби зі зміною клімату та забезпечення енергетичної безпеки спонукає уряди країн світу активно підтримувати розвиток відновлюваних джерел енергії (ВДЕ). Ця підтримка виявляється в різних формах: від встановлення цільових показників частки ВДЕ в енергетичному балансі до надання фінансових стимулів та розвитку відповідної інфраструктури. Важливим елементом цієї політики є також підвищення енергоефективності, що дозволяє зменшити споживання енергії та викиди парникових газів.

За даними "Statistical Review of World Energy 2024", частка ВДЕ в світовому споживанні первинної енергії у 2023 році досягла 14,6%, що демонструє позитивну динаміку, хоча темпи зростання все ще недостатні для досягнення цілей Паризької угоди [19].

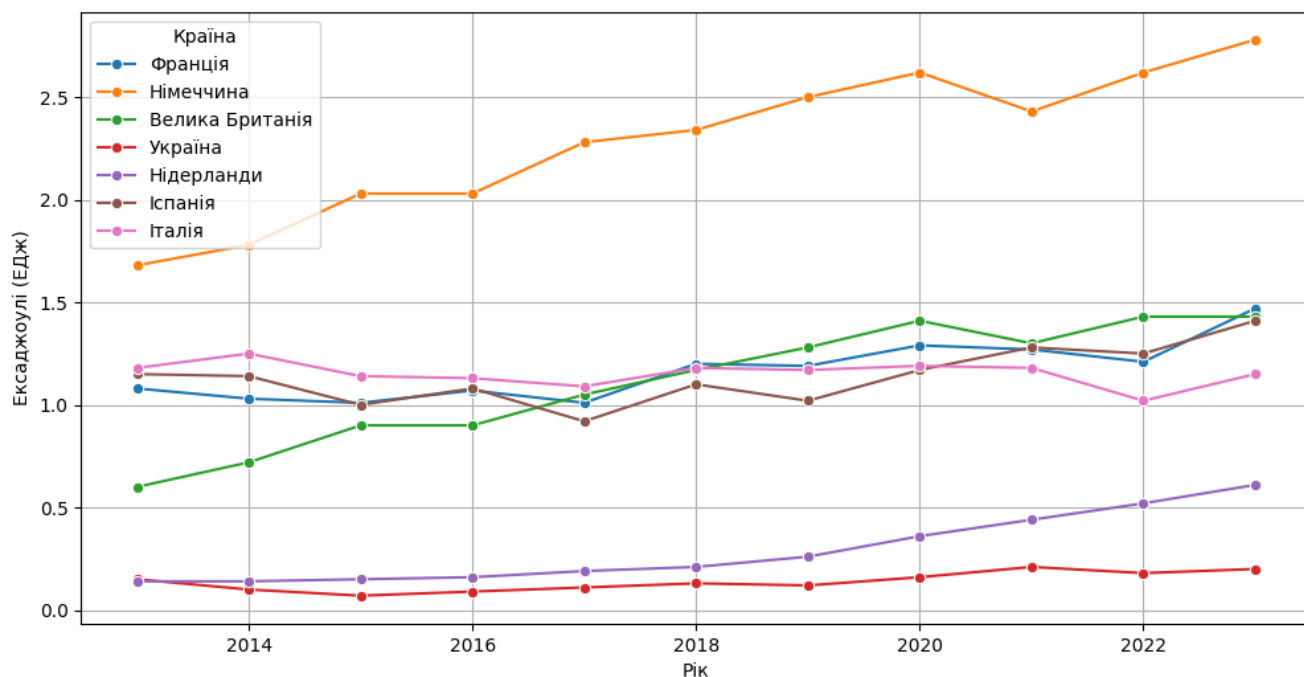


Рисунок 2.9 - Статистичні дані споживання відновлювальних джерел енергії

Джерело: складено автором на основі даних [19]

Європейські країни є лідерами у впровадженні ВДЕ. Високий рівень екологічної свідомості, амбітні кліматичні цілі та прагнення зменшити залежність від імпорту енергоресурсів стимулюють розвиток сонячної, вітрової, гідро- та

біоенергетики в регіоні. Північна та Центральна Європа демонструють найвищі показники використання ВДЕ, що пов'язано зі сприятливими природними умовами та активною державною підтримкою.

2.2 Компаративна аналітика ефективності використання різних видів енергії

Оцінка економічного потенціалу джерел енергії — комплексне завдання, що вимагає врахування численних взаємопов'язаних та часто суперечливих факторів. Традиційні методи, зосереджені переважно на економічних та фінансових показниках, не завжди дають повну картину, оскільки не охоплюють всі аспекти сталого розвитку. Для забезпечення більш об'єктивної та комплексної оцінки, в даному дослідженні застосовується методологія багатокритеріального аналізу (MCDA). MCDA дозволяє інтегрувати економічні, екологічні, технологічні, соціальні та політико-безпекові критерії в єдину модель, забезпечуючи всебічне порівняння різних джерел енергії та формуючи цілісне уявлення про їхній реальний потенціал в контексті сталого розвитку України [35].

Ключові показники ефективності (КПЕ) відіграють важливу роль у MCDA, виступаючи як кількісні метрики для оцінки різних аспектів функціонування енергетичного сектору. Вони відображають ключові виклики, з якими стикаються енергетичні системи, такі як зростання енергоспоживання, проблеми енергоефективності, необхідність забезпечення енергетичної безпеки, волатильність цін, стан інфраструктури та потреба в підвищенні економічної ефективності. Вибір відповідних КПЕ є критично важливим для формування ефективної енергетичної політики, спрямованої на досягнення сталості та підвищення добробуту.

Проте, складний і багатогранний характер енергетичного сектору не дозволяє покласти виключно на обмежений набір КПЕ. Кожен КПЕ відображає лише певний аспект проблеми і не може охопити всі нюанси. MCDA дозволяє подолати це обмеження, інтегруючи множину КПЕ в єдину систему та

враховуючи їх взаємозв'язок. Важливість кожного КПЕ в рамках MCDA визначається його вагою, яка відображає його відносний вплив на загальну оцінку.

В даному дослідженні використовується метод TOPSIS (Technique for Order of Preference by Similarity to Ideal Solution), один з найбільш поширених методів MCDA. TOPSIS базується на концепції ідеального та анти-ідеального рішення. Ідеальне рішення характеризується максимальними значеннями "позитивних" критеріїв (чим більше, тим краще) та мінімальними значеннями "негативних" критеріїв (чим менше, тим краще). Анти-ідеальне рішення навпаки, має мінімальні значення "позитивних" та максимальні значення "негативних" критеріїв. Метод TOPSIS ранжує альтернативи на основі їх відстані до ідеального та анти-ідеального рішення, вибираючи альтернативу, яка є найближчою до ідеального та найдалшою від анти-ідеального. Вибір методу TOPSIS обґрунтований його простотою, прозорістю та здатністю обробляти як якісні, так і кількісні дані. Детальний опис методу TOPSIS, включаючи математичний апарат, буде представлено в наступному розділі [36].

Адекватна оцінка економічного потенціалу енергетичного сектору вимагає комплексного підходу, що враховує не лише економічні показники, але й екологічні, технологічні, соціальні та політико-безпекові аспекти. Для забезпечення всебічного аналізу розроблена система критеріїв, що охоплює ключові фактори, які впливають на сталий розвиток енергетики в Україні. Ця система включає 25 критерій (КПЕ), згрупованих за наступними категоріями (табл. 2.10):

Таблиця 2.10 – Система критерій

Економічні критерії	Приведена вартість електроенергії (LCOE)	Вартість обслуговування
	Окупність інвестицій	Створення робочих місць
	Вартість будівництв	Залучення інвестицій
Екологічні критерії	Викиди парникових газів (CO ₂ , CH ₄ , N ₂ O)	Вплив на біорізноманіття

Продовження табл. 2.10

	Викиди інших забруднюючих речовин (SO ₂ , NO _x , PM)	Площа землі, що використовується
	Використання води	Гнучкість та керованість
Технологічні критерії	Рівень технологічної зрілості	Метеорологічна залежність
	Ефективність (ККД)	Термін служби обладнання
	Інноваційний потенціал	Гнучкість та керованість
Соціальні критерії	Суспільна прийнятність	Інфраструктурний розвиток
	Вплив на місцеву економіку	
Політичні та безпекові критерії	Енергетична безпека (залежність від імпорту)	Потенціал для корупції
	Рівень державної підтримки	

Джерело: складено автором

Економічні критерії.

Приведена вартість електроенергії (LCOE). Цей індикатор є фундаментальним для порівняння енергогенеруючих технологій. LCOE відображає усереднену вартість виробництва кіловат-години з урахуванням повного життєвого циклу електростанції. До розрахунку входять інвестиційні витрати (спорудження об'єкта, закупівля устаткування), операційні видатки (паливно-енергетичні ресурси, сервісне обслуговування), фінансові витрати та витрати на виведення з експлуатації. Методологія LCOE дає змогу враховувати відмінності у термінах експлуатації та структурі витрат різних технологій. Характерною особливістю є те, що відновлювані джерела енергії потребують значних початкових інвестицій при мінімальних експлуатаційних витратах, тоді як класичні теплові станції характеризуються нижчими капітальними, але вищими паливними витратами. В українському контексті показник LCOE набуває особливої ваги при формуванні тарифної політики та оцінці інвестиційної привабливості енергетичних проектів.

Окупність інвестицій. Даний показник визначає часовий проміжок, за який генеровані проектом доходи компенсують початкові вкладення. Він слугує

індикатором швидкості повернення інвестованого капіталу. Скорочений період окупності підвищує інвестиційну привабливість, особливо в умовах підвищеної волатильності. Проте, цей метод не враховує фінансові потоки після точки беззбитковості. Комплексна оцінка економічної доцільності вимагає застосування додаткових метрик: показника рентабельності інвестицій (ROI), що демонструє співвідношення прибутку до вкладень, та чистої приведеної вартості (NPV), яка враховує часову цінність грошей через дисконтування майбутніх грошових потоків.

Вартість будівництва. До вартості спорудження енергогенеруючого об'єкта входять витрати на проектно-конструкторські роботи, придбання технологічного обладнання, будівельні матеріали, оплату праці та супутні видатки. Це формує найвагомішу частку початкових інвестицій. Оптимізація будівельних витрат потребує врахування технологічних рішень, локації об'єкта, доступності матеріалів та кваліфікованих кадрів. Критичним фактором виступає дотримання термінів будівництва, оскільки затримки призводять до здорожчання проекту та недоотримання прибутку.

Вартість обслуговування. Включають витрати на поточне технічне обслуговування, ремонтні роботи, комплектуючі та заробітну плату персоналу. Масштаб цих витрат варіюється залежно від технології генерації та специфікації обладнання. Аналіз потребує деталізації за компонентами: запасні частини, планово-попереджувальні та аварійні ремонти, технічне обслуговування, моніторинг стану обладнання, оплата праці.

Створення робочих місць. Розширення енергетичного сектору стимулює створення робочих місць різного кваліфікаційного рівня. Оцінка даного параметра враховує не лише кількісні показники працевлаштування, але й якісні характеристики: рівень кваліфікації, умови праці, системи оплати. Висококваліфіковані позиції з конкурентною оплатою сприяють розвитку людського капіталу та підвищенню добробуту населення. Важливо враховувати мультиплікативний ефект на суміжні галузі.

Залучення інвестицій. Обсяг залучених інвестицій демонструє економічний

потенціал енергетичного проекту. Аналіз охоплює структуру інвестиційного портфеля (внутрішній/зовнішній капітал, державне/приватне фінансування) та умови залучення коштів (пільгове кредитування, гарантії, податкові преференції). Суттєвим компонентом є оцінка інвестиційних ризиків та механізмів їх мітигації.

Екологічні критерії.

Викиди парникових газів (CO₂, CH₄, N₂O). Генерація антропогенних парникових газів (CO₂, CH₄, N₂O) виступає домінантним фактором кліматичних трансформацій глобального масштабу. Енергетичний сектор, зокрема термічна генерація на основі викопних енергоносіїв, є ключовим джерелом емісії. Методологія оцінки передбачає врахування повного життєвого циклу енергогенеруючих об'єктів: від видобутку та транспортування паливних ресурсів до експлуатації та декомісії потужностей. Стратегічним пріоритетом України є досягнення кліматичної нейтральності через розвиток відновлюваної енергетики, впровадження енергоефективних технологій та систем уловлювання вуглецю, що корелює з міжнародними кліматичними зобов'язаннями держави.

Викиди інших забруднюючих речовин (SO₂, NO_x, PM). Процес спалювання викопного палива супроводжується викидами діоксиду сірки, оксидів азоту та дрібнодисперсних частинок, що призводить до деградації атмосферного басейну та негативно впливає на громадське здоров'я. Рівень емісії варіюється залежно від технології генерації: вугільна генерація характеризується найвищими показниками забруднення, газова – помірними, тоді як відновлювані джерела демонструють мінімальний вплив на якість повітря. Враховуючи критичний стан атмосферного басейну в індустріальних регіонах України, пріоритетними завданнями є модернізація очисного обладнання, посилення екологічного моніторингу та стимулювання розвитку екологічно чистої генерації.

Використання води. Гідроресурси в енергетичному секторі використовуються для охолодження термічних установок, гідроенергетики та видобутку вуглеводнів. Інтенсивне водокористування може спричиняти деградацію водних екосистем, особливо в регіонах з обмеженими водними ресурсами. Оцінка водного балансу різних технологій генерації має враховувати

як кількісні показники споживання, так і якісні параметри впливу на гідросферу. В умовах кліматичних змін та зниження водності українських річок, впровадження водозберігаючих технологій та замкнутих систем водопостачання набуває стратегічного значення.

Вплив на біорізноманіття. Розвиток енергетичної інфраструктури здійснює комплексний вплив на екосистеми через фрагментацію ареалів існування, модифікацію міграційних коридорів та трансформацію природних ландшафтів. Специфічні впливи включають: зміну гідрологічного режиму річок гідроелектростанціями, ризики для орнітофауни від вітрових установок, забруднення ґрунтів при видобутку енергоресурсів. Мінімізація негативного впливу потребує комплексної екологічної оцінки проектів, імплементації природоохоронних заходів та розвитку екологічного моніторингу. Особлива увага приділяється збереженню унікальних екосистем України.

Площа землі, що використовується. Розміщення енергетичних об'єктів вимагає значних земельних ресурсів, що створює конкуренцію з альтернативними формами землекористування - агропромисловим комплексом, лісовим господарством та рекреаційною діяльністю. Оптимізація земельного фонду потребує оцінки питомих показників землемісткості різних технологій генерації та їх впливу на продуктивність земель. Пріоритетним є впровадження проектів з мінімальним земельним відведенням та розвиток механізмів багатоцільового використання територій.

Вплив на ландшафт. Масштабні енергетичні об'єкти (гідроакумуючі електростанції, вітрові та сонячні парки) здійснюють істотний вплив на візуальні характеристики ландшафту, що може мати як позитивні, так і негативні естетичні та рекреаційні наслідки. Оптимізація просторового розміщення енергетичних об'єктів потребує врахування ландшафтного планування та громадських інтересів, особливо в регіонах з високим туристично-рекреаційним потенціалом.

Технологічні критерії.

Потужність видобутку енергії. Критерій відображає технічну здатність енергетичної технології генерувати електричну потужність. Враховує номінальну

встановлену потужність обладнання, стабільність генерації та можливості масштабування. Важливими параметрами є максимальна потужність, коефіцієнт використання встановленої потужності, діапазон регулювання потужності та адаптивність до змінних навантажень в енергетичній системі. В українському контексті особливої ваги набуває здатність технології забезпечувати базове або пікове навантаження з урахуванням специфіки національної енергетичної інфраструктури.

Рівень технологічної зрілості. Індикатор відображає ступінь апробації та верифікації технологічних рішень в енергогенерації. Зрілі технології характеризуються накопиченим експлуатаційним досвідом та підтверженою надійністю, що мінімізує технологічні ризики та непередбачувані експлуатаційні витрати. Критичними факторами для імплементації технологій в українському контексті виступають адаптованість до регіональних кліматичних умов та наявність кваліфікованого інженерно-технічного персоналу.

Ефективність (ККД). Коефіцієнт корисної дії виступає ключовим параметром оцінки ефективності перетворення первинних енергоресурсів в електричну енергію. Максимізація ККД забезпечує оптимізацію ресурсоспоживання та мінімізацію операційних витрат. В умовах високої вартості енергоносіїв в Україні, підвищення енергоефективності генеруючих потужностей є визначальним фактором економічної конкурентоспроможності енергетичного сектору.

Інноваційний потенціал. Диференціація технологій за потенціалом подальшого вдосконалення визначає перспективи оптимізації техніко-економічних показників, включаючи підвищення ефективності, зниження собівартості та мінімізацію екологічного впливу. Пріоритетність інвестування в технології з високим інноваційним потенціалом забезпечує довгострокові конкурентні переваги та відповідає стратегічним цілям технологічної модернізації енергетичного сектору України.

Гнучкість та керованість. Характеристика визначає адаптивність технологічних рішень до різних масштабів генерації. Оптимальні діапазони

потужності варіюються залежно від специфіки технології, що потребує врахування при стратегічному плануванні структури генеруючих потужностей.

Метеорологічна залежність. Стохастичний характер генерації, характерний для відновлюваних джерел енергії, визначає необхідність врахування кліматичних особливостей регіону при проектуванні енергетичних об'єктів та забезпечення резервних потужностей.

Термін служби обладнання. Довговічність енергетичного обладнання визначає амортизаційний період та впливає на економічну ефективність через витрати на реновацію та утилізацію.

Соціальні критерії.

Суспільна прийнятність. Рівень прийнятності енергетичних проектів місцевими громадами виступає критичним фактором успішної реалізації. Забезпечення соціальної легітимності потребує імплементації механізмів громадської участі, прозорості інформації та врахування локальних соціокультурних особливостей. В українському контексті, з огляду на попередній досвід соціальних конфліктів, формування суспільного консенсусу набуває пріоритетного значення.

Вплив на місцеву економіку. Реалізація енергетичних проектів здійснює комплексний вплив на місцеву економіку. Позитивні ефекти включають зростання зайнятості, розбудову інфраструктури, збільшення податкових надходжень, активізацію підприємництва, стимулювання суміжних галузей та зміцнення технологічного суверенітету України. Необхідним є збалансований підхід до оцінки впливу на громади та розробка компенсаційних механізмів.

Інфраструктурний розвиток. Енергетичні проекти каталізують модернізацію транспортної та енергетичної інфраструктури, підвищуючи логістичну доступність регіонів та створюючи передумови для економічного зростання.

Політичні та безпекові критерії.

Енергетична безпека (залежність від імпорту). Забезпечення енергетичної незалежності є стратегічним пріоритетом національної безпеки України.

Надмірна залежність від зовнішніх постачальників енергоресурсів, особливо монопольних, становить суттєву загрозу економічній стабільності та геополітичній стійкості держави. Ключовими напрямками зміцнення енергетичної безпеки виступають: диверсифікація джерел та маршрутів постачання енергоносіїв, нарощування власного видобутку, впровадження енергоефективних технологій та розвиток альтернативної енергетики.

Рівень державної підтримки. Ефективність державної політики у сфері енергетики визначає темпи розвитку та модернізації галузі. Формування прогнозованого регуляторного середовища та впровадження дієвих механізмів стимулювання є базовими передумовами для залучення інвестицій та технологічного оновлення енергетичного сектору. Державна підтримка має реалізовуватися через комплекс інструментів: спеціальні кредитні програми, податкові стимули, державні гарантії та регуляторні преференції. Для України критично важливим є забезпечення стабільних правил функціонування енергетичного ринку та створення конкурентних умов, що сприятимуть підвищенню ефективності галузі в цілому.

Потенціал для корупції. Масштабність фінансових операцій та складність регуляторних механізмів в енергетичному секторі створюють передумови для корупційних ризиків. Мінімізація корупційної складової потребує системного підходу до забезпечення прозорості галузевого управління та контролю за фінансовими потоками. Пріоритетними завданнями для України є впровадження ефективних механізмів запобігання корупції, забезпечення публічності процесів прийняття рішень та посилення контролю за використанням бюджетних коштів в енергетичній сфері. Важливу роль відіграє також імплементація міжнародних стандартів прозорості та антикорупційних практик через активну співпрацю з міжнародними партнерами.

Визначення ваг критеріїв.

Визначення ваг критеріїв є важливим етапом побудови багатокритеріальної моделі, оскільки вони відображають відносну важливість кожного критерію при оцінці джерел енергії. В даному дослідженні для визначення ваг критеріїв

застосовано експертний метод, що базується на аналізі літератури, врахуванні специфіки енергетичного сектору України. Експертний метод обрано через відсутність однозначних кількісних даних для об'єктивного визначення ваг, а також через необхідність врахування якісних факторів, які важко формалізувати.

Оскільки в моделі буде застосовуватися метод TOPSIS, для зручності визначення типу критерію ("витрати" чи "вигода") та його впливу на результати MCDA, використовується система ваг зі знаками. Позитивне значення ваги вказує на критерій "вигоди" (чим більше значення, тим краще), а негативне - на критерій "витрат" (чим менше значення, тим краще). Абсолютне значення ваги відображає її відносну важливість в порівнянні з іншими критеріями [36]. Сума абсолютних значень ваг усіх критеріїв дорівнює одиниці (табл. 2.11).

Таблиця 2.11 – Ваги критерій

Критерій	Вага
LCOE	-0,12
Окупність інвестицій	-0,08
Вартість будівництва	-0,1
Вартість обслуговування	-0,06
Створення робочих місць	0,05
Залучення інвестицій	0,05
Викиди парникових газів	-0,1
Викиди інших забруднюючих речовин	-0,06
Використання води	-0,05
Вплив на біорізноманіття	-0,04
Площа землі	-0,03
Вплив на ландшафт	-0,03
Потужність видобутку енергії	0,07

Критерій	Вага
Рівень технологічної зрілості	0,05
Ефективність (ККД)	0,06
Інноваційний потенціал	0,04
Гнучкість та керованість	0,04
Метеорологічна залежність	-0,03
Термін служби обладнання	0,03
Суспільна прийнятність	0,03
Вплив на місцеву економіку	0,03
Інфраструктурний розвиток	0,03
Енергетична безпека	0,03
Рівень державної підтримки	0,02
Потенціал для корупції	-0,02

Джерело: складено автором

Оцінка джерел енергії за критеріями.

Після визначення ваг критеріїв була проведена оцінка кожного джерела енергії за встановленими критеріями. Для цього було використано комбінацію кількісних даних (наприклад, дані про LCOE, викиди CO₂) та якісних оцінок,

отриманих шляхом експертного аналізу. Результати оцінки представлені у вигляді балів за шкалою від 1 до 15, де 1 - найгірший показник, а 15 - найкращий. Використання такої шкали дозволяє стандартизувати оцінки за різними критеріями та полегшити їх порівняння (рис. 2.12).

Джерело енергії	LSOE	Окупність інвестицій	Вартість будівництва	Вартість обслуговування	Створення робочих місць	Залучення інвестицій	Викиди парникових газів	Викиди інших забруднюючих речовин	Використання води	Вплив на біорізноманіття	Площа землі	Вплив на ландшафт	Рівень технологічної зрілості	Ефективність (ККД)	Інноваційний потенціал	Гнучкість та керування	Метеорологічна залежність	Термін служби та обслуговування	Суспільна прийнятність	Вплив на місцеву економіку	Інфраструктурний розвиток	Енергетична безпека	Рівень державної підтримки	Позиція
Вугілля	5	8	8	10	10	5	15	15	10	11	10	12	14	8	2	5	1	9	4	12	9	8	6	
Природний газ	7	7	8	7	8	7	10	7	7	8	6	6	13	9	4	11	1	11	7	9	8	6	8	
Атомна енергетика	11	6	15	12	7	11	2	4	13	6	8	5	12	11	7	2	1	13	5	7	5	12	10	
Сонячна енергія	6	6	8	3	4	13	2	2	3	7	11	9	10	10	13	7	15	12	12	8	7	11	12	
Вітрова енергія	5	7	9	5	4	12	2	2	1	9	9	8	11	12	12	8	13	10	11	7	7	10	11	
Гідроенергетика	4	7	14	6	6	8	2	7	3	12	14	14	15	14	5	13	7	14	8	10	10	9	7	
Геотермальна	9	7	7	4	4	5	3	6	5	5	3	3	8	6	9	6	1	12	10	4	4	5	4	
Біоенергетика	7	7	4	7	9	8	5	5	6	9	5	5	9	8	11	9	3	9	11	14	9	7	9	

Рисунок 2.12 – Наглядна частина оцінок джерел енергії
Джерело: розраховано автором

2.3 Моделювання з прикладної компаративної аналітики економічного потенціалу енергетичного сектору

Багатокритеріальний аналіз (MCDA) є невід’ємною складовою сучасної компаративної аналітики, особливо у сфері енергетики, яка вимагає комплексного підходу до оцінки та порівняння джерел енергії. Цей підхід дозволяє приймати обґрунтовані рішення на основі врахування багатьох взаємопов’язаних критеріїв, таких як економічна ефективність, екологічний вплив, надійність та перспективність. У цьому дослідженні застосовано метод TOPSIS (Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution), який є одним із найбільш ефективних і широко використовуваних методів MCDA [35].

Розкриваючи методологію дослідження економічного потенціалу енергетичного сектору, важливо розуміти, чому саме метод TOPSIS та моделювання Монте-Карло стали ключовими інструментами аналізу.

Вибір методу TOPSIS не випадковий. У складному світі енергетики, де

кожне джерело має унікальний набір характеристик, існує потреба методу, який дозволить комплексно оцінити та порівняти різні альтернативи. TOPSIS пропонує елегантне рішення: він не просто ранжує альтернативи, а визначає їхню ефективність через *proximity* до ідеального рішення. На відміну від інших методів багатокритеріального аналізу, як-от АНР (Analytic Hierarchy Process) або ELECTRE, TOPSIS має декілька принципових переваг. По-перше, вона базується на інтуїтивно зрозумілих принципах близькості до ідеального рішення, що спрощує інтерпретацію результатів. По-друге, метод дозволяє враховувати як кількісні, так і якісні критерії, що робить його універсальним у застосуванні. По-третє, TOPSIS забезпечує чітке ранжування альтернатив, що є ключовим для прийняття рішень [36].

Для глибшого аналізу, також використовується моделювання Монте-Карло. Цей метод, виступає потужним інструментом аналізу невизначеностей. Енергетична галузь характеризується високою динамічністю та безліччю змінних, які складно передбачити. Класичний статичний аналіз часто не здатен врахувати всі можливі варіації вхідних параметрів. Саме тому було обрано метод Монте-Карло, який дозволяє змоделювати широкий спектр сценаріїв та оцінити стійкість висновків.

Принцип роботи Монте-Карло простий, але потужний: штучне генерування безліч варіацій вхідних даних у межах розумних діапазонів невизначеності. Кожна ітерація дає нам трохи відмінну картину, і сукупність цих картин дозволяє зробити набагато надійніший прогноз, ніж традиційні статистичні методи [37].

Альтернативні методи, такі як детерміновані підходи або прості бальні оцінки, мають значні обмеження. Вони або не враховують багатокритеріальність, або надто спрощують реальну картину. TOPSIS з доповненням Монте-Карло дозволяє подолати ці обмеження, забезпечуючи більш глибокий та всебічний аналіз.

Особливо цінним є те, що запропонована методологія не лише надає *numbers*, але й дає змогу зрозуміти чутливість висновків до зміни вхідних параметрів. Це критично важливо в контексті енергетичної стратегії, де рішення

мають довгострокові наслідки та мільярдні інвестиційні виміри [37].

Теоретичні основи методу TOPSIS.

Метод TOPSIS базується на ідеї ідеального рішення, яке характеризується найкращими значеннями всіх критеріїв, та антирішення, що відповідає найгіршим значенням. Основна мета методу — обрати альтернативу, яка одночасно є найближчою до ідеального рішення та найдалі від антирішення.

Алгоритм методу TOPSIS включає такі етапи:

Нормалізація даних. Для усунення впливу одиниць вимірювання застосовується нормалізація за формулою (формула 2.13):

$$r_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sqrt{\sum_{i=1}^m x_{ij}^2}} \quad (2.13)$$

де r_{ij} — нормалізоване значення критерію j для альтернативи i ;

x_{ij} — початкове значення.

Визначення зважених нормалізованих значень. Зважування проводиться з урахуванням важливості критеріїв (формула 2.14)::

$$v_{ij} = w_j * r_{ij} \quad (2.14)$$

де w_j — вага критерію j .

Розрахунок ідеальних рішень. Ідеальне позитивне рішення A_j^+ визначається як максимум для критеріїв вигоди та мінімум для критеріїв витрат, тоді як ідеальне негативне рішення A_j^- є їх протилежністю.

Обчислення відстаней до ідеальних рішень. Відстані до позитивного та негативного рішень обчислюються за евклідовою метрикою (формула 2.15):

$$S_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^n (v_{ij} - A_j^+)^2}, \quad S_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^n (v_{ij} - A_j^-)^2} \quad (2.15)$$

Розрахунок показника близькості до ідеального рішення (формула 2.16):

$$C_i = \frac{S_i^-}{S_i^+ + S_i^-} \quad (2.16)$$

де C_i — коефіцієнт, що визначає позицію альтернативи між ідеальним позитивним та негативним рішеннями.

Методологія TOPSIS забезпечує ранжування альтернатив за значенням C_i , що дозволяє визначити найкращі варіанти відповідно до заданих критеріїв [36].

Опис програмної реалізації.

Для реалізації методу TOPSIS було використано мову програмування Python з бібліотеками pandas, matplotlib та pymcdm. Код складається з кількох основних етапів, кожен з яких відповідає етапам алгоритму TOPSIS.

Процес розпочинається з імпорту даних з двох Excel-файлів за допомогою функції `pd.read_excel` (рис. 2.17). Перший файл містить значення характеристик різних джерел енергії за встановленими критеріями (див. рис. 2.12), а другий — вагові коефіцієнти для кожного критерію (див. таб. 2.11).

```
import pandas as pd
import matplotlib.pyplot as plt
from pymcdm.methods import TOPSIS
import numpy as np

df_data = pd.read_excel("1.xlsx")
df_weights = pd.read_excel("2.xlsx")
```

Рисунок 2.17 – Імпорт бібліотек та даних

Джерело: розраховано автором

Важливим етапом є трансформація даних: критерії виділяються в окремий список, а самі дані перетворюються у структуровану словникову форму, де кожне джерело енергії стає ключем, а його параметри — відповідними значеннями (рис. 2.18). Такий підхід створює зручне підґрунтя для подальших розрахунків.

```
criteria = list(df_data.columns[1:])

data = df_data.set_index('Джерело енергії').to_dict('index')
weights = df_weights.set_index('критерій')['вага'].to_dict()
criteria_types = []
normalized_weights = []
```

Рисунок 2.18 – Трансформація даних

Джерело: розраховано автором

Робота з ваговими коефіцієнтами передбачає їх перетворення в словник, де кожному критерію відповідає певна вага (рис. 2.19). Далі відбувається аналіз ваг для визначення типології критеріїв: позитивні ваги інтерпретуються як критерії вигоди, від'ємні — як критерії витрат. Такий диференційований підхід дозволяє врахувати специфічні особливості кожного параметра в загальній оціночній моделі. Всі вагові коефіцієнти проходять процедуру нормалізації аби сума всіх критерій дорівнювала 1. Це забезпечує коректність розрахунків у багатокритеріальному аналізі.

```

criteria_types = []
normalized_weights = []

for criterion in criteria:
    weight = weights[criterion]
    if weight > 0:
        criteria_types.append('benefit')
    else:
        criteria_types.append('cost')
        normalized_weights.append(abs(weight))

total_weight = sum(normalized_weights)
normalized_weights = np.array(normalized_weights) / total_weight

```

Рисунок 2.19 – Нормалізація ваг

Джерело: розраховано автором

Підготовка даних для методології TOPSIS включає формування числових матриць з характеристиками альтернатив. Бібліотека `numpy` надає потужні можливості для ефективної обробки матричних даних та виконання необхідних математичних операцій. Саме застосування методу TOPSIS здійснюється через бібліотеку `rumcdm` і включає декілька послідовних кроків. На першому етапі проводиться нормалізація значень для кожного критерію, що уможливорює коректне порівняння альтернатив, навіть якщо критерії вимірюються в різних одиницях. Потім визначаються еталонні точки — ідеально позитивне та ідеально негативне рішення для кожного критерію. Для кожного джерела енергії обчислюються відстані до цих *référéncé*-точок. На підставі отриманих відстаней розраховується інтегральний показник близькості до ідеального рішення (TOPSIS

Score), який комплексно характеризує ефективність кожної альтернативи (рис. 2.20).

```
data_matrix = []
for source, values in data.items():
    data_matrix.append(list(values.values()))

data_matrix = np.array(data_matrix, dtype=float)

topsis = TOPSIS()
scores = topsis(data_matrix, normalized_weights, criteria_types)

df_data['TOPSIS Score'] = scores
df_data = df_data.sort_values(by='TOPSIS Score', ascending=False)
```

Рисунок 2.20 – Розраховування інтегрального показника для оцінки
Джерело: розраховано автором

Результати розрахунків інтегруються в *initial* DataFrame у вигляді нового стовпця TOPSIS Score, після чого дані сортуються за цим показником у низхідному порядку. Це дозволяє чітко ідентифікувати найбільш ефективні джерела енергії з огляду на задані критерії та вагові коефіцієнти. Рейтинг джерел енергії, отриманий за методом TOPSIS, відображає їхню інтегральну ефективність (рис. 2.21). На горизонтальній гістограмі чітко простежується диференціація альтернатив: вищі значення TOPSIS Score вказують на більш перспективні та збалансовані джерела енергії. Такий підхід дає змогу особам, що приймають рішення, мати наочне уявлення про порівняльні переваги кожного енергетичного джерела.

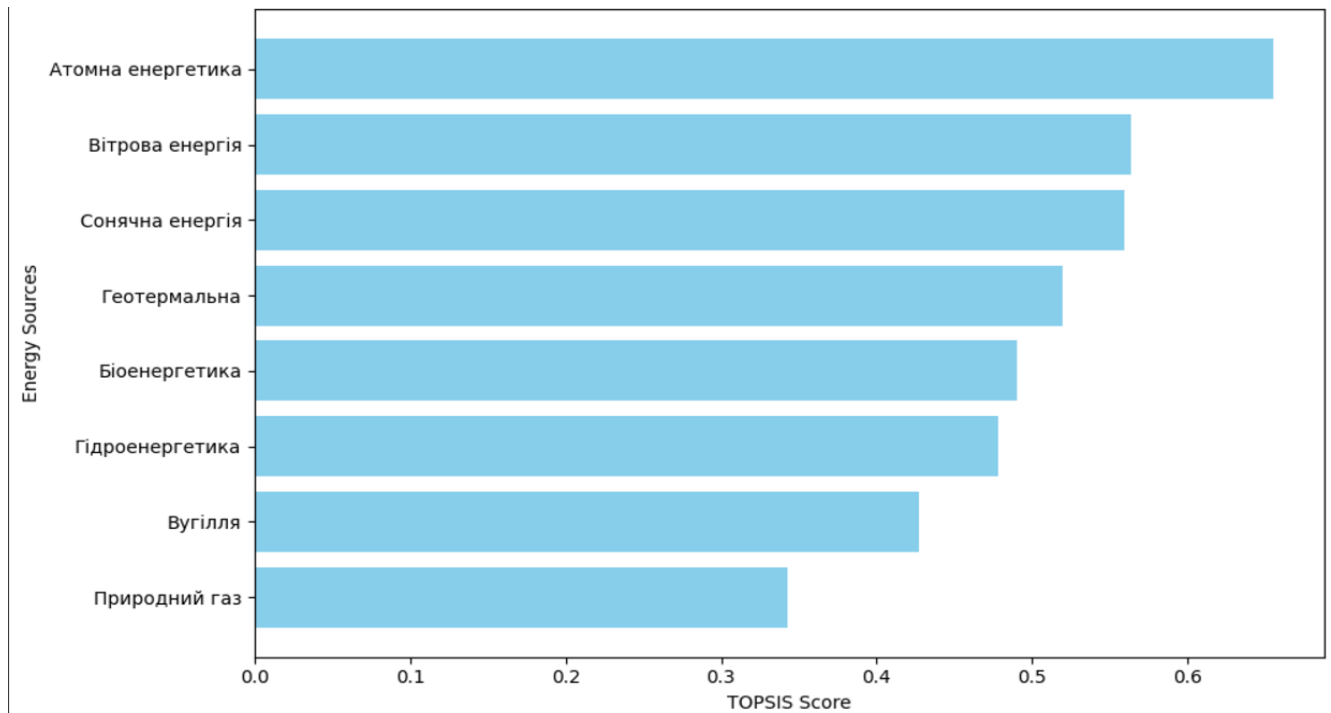


Рисунок 2.21 – Візуалізація оцінок

Джерело: розраховано автором

Далі програмується функція `monte_carlo`, яка виконує моделювання методом Монте-Карло для оцінки впливу невизначених вхідних оцінок на остаточний рейтинг TOPSIS (рис. 2.22).

Функція приймає такі параметри:

- `data`: Словник, що містить початкові дані, де ключі - це джерела енергії, а значення - словник з оцінками за кожним критерієм.
- `criteria_types`: Список, що вказує, чи є кожен критерій типом "вигоди" чи "витрат".
- `weights`: Масив NumPy з нормалізованими вагами для кожного критерію.
- `uncertainty_percentage`: Відсоток невизначеності, який застосовується до вхідних оцінок (наприклад, $\pm 20\%$).
- `num_iterations`: Кількість ітерацій моделювання Монте-Карло, яка буде виконана.

```
def monte_carlo(data, criteria_types, weights, uncertainty_percentage=0.2, num_iterations=1000):
    num_criteria = len(criteria_types)
    results = []
```

Рисунок 2.22 – Застосування методу Монте-Карло

Джерело: розраховано автором

Код потім ітеративно проходить через кількість ітерацій Монте-Карло (рис. 2.23). За кожну ітерацію:

- Створюється нова матриця даних (`data_matrix_iteration`), застосовуючи вказаний відсоток невизначеності до кожної вхідної оцінки. Нові оцінки генеруються випадковим чином в межах мін-макс діапазону.
- Оновлена матриця даних перетворюється в масив NumPy.
- Метод TOPSIS застосовується до оновленої матриці даних, а результуючі оцінки TOPSIS додаються до списку `results`.
- Після всіх ітерацій, список `results` перетворюється в `pandas DataFrame`, де колонки відповідають джерелам енергії, а рядки - оцінкам TOPSIS з кожної ітерації.

```

for _ in range(num_iterations):
    data_matrix_iteration = []
    for source, values in data.items():
        source_scores = []
        for criterion, score in values.items():
            variation = score * uncertainty_percentage
            min_val = max(1, score - variation)
            max_val = min(15, score + variation)
            source_scores.append(random.uniform(min_val, max_val))
        data_matrix_iteration.append(source_scores)
    data_matrix_iteration = np.array(data_matrix_iteration, dtype=float)

    topsis_scores = topsis(data_matrix_iteration, weights, criteria_types)
    results.append(list(topsis_scores))

columns = list(df_data['Джерело енергії'])
results_df = pd.DataFrame(results, columns=columns)
return results_df

```

Рисунок 2.23 – Ітерація методу Монте-Карло
Джерело: розраховано автором

Візуалізація результатів Монте-Карло представлена двома ключовими графічними формами. По-перше, боксплот демонструє статистичний розподіл TOPSIS Score для кожного джерела енергії (рис. 2.24). Він розкриває не лише середні значення, але й варіативність оцінок, показуючи діапазон можливих

результатів, медіану та викиди.

Додатковим інструментом аналізу слугує графік щільності розподілу, який унаочнює ймовірнісні характеристики TOPSIS Score (рис. 2.25) . Криві щільності дають змогу зрозуміти, наскільки концентровані або розпорошені оцінки навколо центральних значень для кожного джерела енергії.

Статистичні підсумки Monte-Carlo моделювання надають кількісну інформацію про середні значення, стандартні відхилення, мінімальні та максимальні оцінки. Це забезпечує додаткове підґрунтя для інтерпретації результатів, демонструючи не лише точкові оцінки, але й діапазон можливих варіацій.

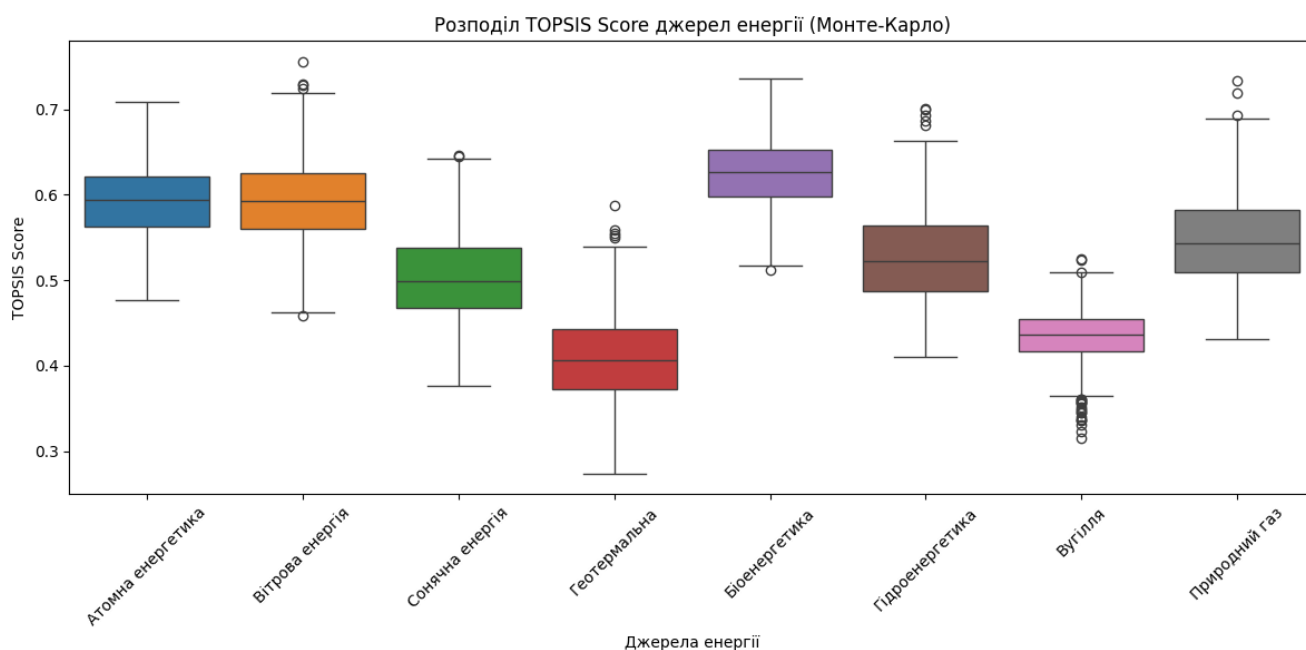


Рисунок 2.24 – Статистичний розподіл TOPSIS Score
Джерело: розраховано автором

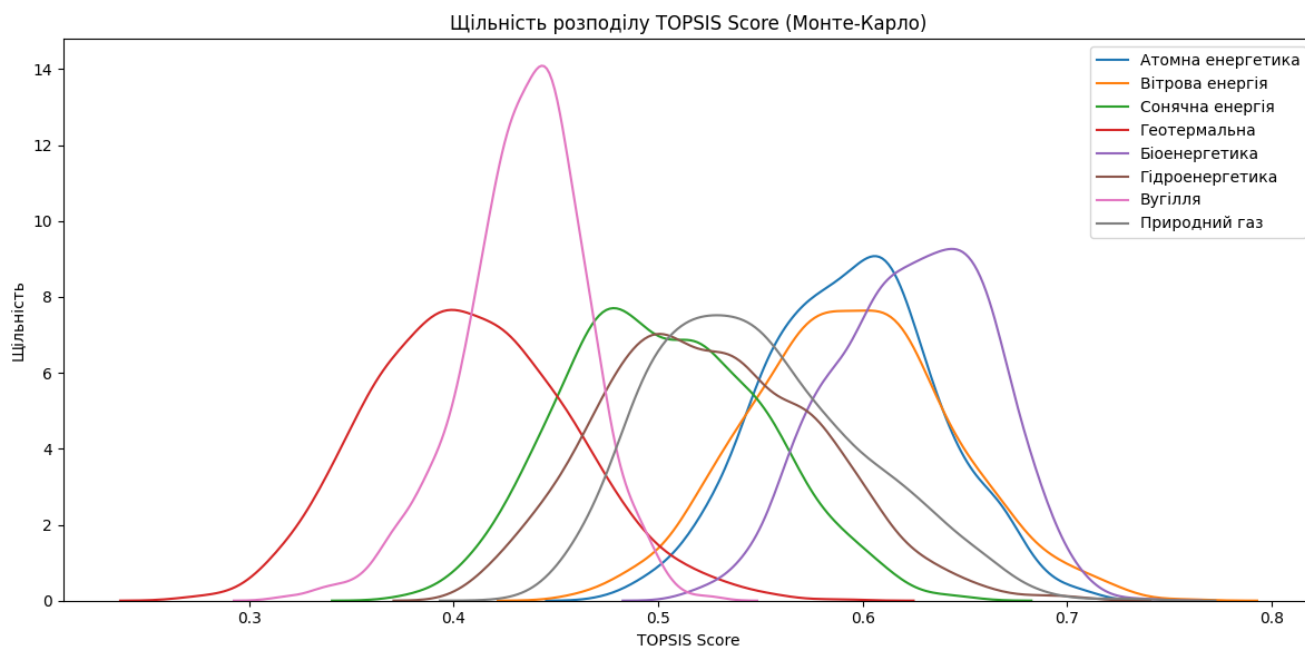


Рисунок 2.25 – Графік щільності розподілу

Джерело: розраховано автором

Аналіз Монте-Карло дозволяє нам зрозуміти чутливість рейтингів TOPSIS до невизначеностей у вхідних даних. Генеруючи розподіл оцінок TOPSIS для кожного джерела енергії, можна оцінити стабільність і міцність рейтингів, що є цінною інформацією для осіб, які приймають рішення.

Звісно, жоден метод не є панацеєю. TOPSIS та Монте-Карло мають свої обмеження: вони залежать від коректності визначення вагових коефіцієнтів, припускають лінійність взаємозв'язків між критеріями. Проте в дослідженні вони виявилися найбільш адекватними інструментами для комплексної оцінки потенціалу різних джерел енергії.

Висновки до другого розділу

Енергетичний сектор сучасного світу перебуває в стадії суттєвих трансформацій, зумовлених глобальними викликами, такими як зміна клімату, підвищення попиту на енергію та необхідність переходу до більш екологічних технологій. Україна, як частина міжнародного енергетичного простору, також адаптується до цих змін, здійснюючи поступовий перехід до використання відновлюваних джерел енергії (ВДЕ).

Національний енергетичний сектор зберігає високу залежність від традиційних джерел, таких як вугілля та природний газ, які забезпечують значну частку енергопостачання. Однак тенденції поступового скорочення використання цих ресурсів зумовлені як економічними, так і екологічними факторами. Водночас, розвиток ВДЕ, таких як сонячна та вітрова енергія, отримує підтримку з боку міжнародних організацій, що сприяє зростанню інвестицій у цю сферу.

Попри позитивні зрушення, розвиток енергетичного сектору України стикається з низкою викликів, зокрема недостатньою модернізацією енергетичної інфраструктури, відсутністю інтегрованих систем управління "розумними" мережами та нерівномірною доступністю енергоресурсів у різних регіонах. Аналіз свідчить, що вирішення цих питань є ключовим для забезпечення довгострокової енергетичної безпеки та сталого розвитку.

Проведення багатокритеріального аналізу із застосуванням методу TOPSIS дозволило всебічно оцінити ефективність використання традиційних та відновлюваних джерел енергії на основі таких критеріїв, як економічна доцільність, екологічна безпека, рівень технологічної зрілості та соціальна прийнятність. Вибір критеріїв базувався на їхній значущості для оцінки економічної, екологічної та соціальної доцільності енергетичних проектів.

Ваги критеріїв визначалися на основі аналізі літератури та даних, отриманих від аналізу міжнародних звітів (IRENA, IEA) та інших джерел. Наприклад, LCOE отримав найвищу вагу, що підкреслює його важливість для оцінки економічної доцільності, тоді як екологічні показники мали високий, але другорядний пріоритет. Суспільна прийнятність і технологічна зрілість отримали середні ваги, що обґрунтовується їхнім довгостроковим впливом на розвиток сектору.

Аналіз підтвердив, що традиційні джерела енергії, такі як вугілля та природний газ, залишаються привабливими завдяки їхній високій енергетичній щільності та відносно низьким операційним витратам. Однак їхній суттєвий негативний вплив на довкілля, зокрема високі викиди парникових газів, значно обмежує перспективи довгострокового використання. Водночас, відновлювані джерела, як-от сонячна і вітрова енергія, демонструють значний потенціал до

зменшення екологічного навантаження та підвищення енергетичної незалежності, незважаючи на потребу в значних початкових інвестиціях та модернізації інфраструктури.

3 НАПРЯМИ ПІДВИЩЕННЯ ЕКОНОМІЧНОГО ПОТЕНЦІАЛУ ЕНЕРГЕТИЧНОГО СЕКТОРУ

3.1 Вдосконалення методів компаративної аналітики економічного потенціалу енергетичного сектору

Аналіз отриманих результатів багатокритеріального оцінювання джерел енергії виявив цікаву та важливу картину для енергетичного сектору України. Застосування методу TOPSIS дозволило всебічно оцінити різні джерела енергії, враховуючи економічні, екологічні, технічні та соціальні аспекти їх використання. Результати аналізу відображають реальний потенціал кожного джерела енергії в контексті сучасних викликів та можливостей розвитку енергетичного сектору України.

Дослідження економічного потенціалу енергетичного сектору України за допомогою методу TOPSIS та моделювання Монте-Карло розкриває шляхи трансформації вітчизняної енергетики в контексті геополітичних, економічних та кліматичних викликів. Результати моделювання дозволяють оцінити не лише ефективність різних джерел енергії, але й їх стійкість до змін зовнішніх факторів та взаємозв'язок між критеріями оцінки. Моделювання Монте-Карло дозволило оцінити не тільки середні значення показників, але й їх варіативність, що відображає невизначеність та ризики, пов'язані з розвитком енергетичного сектору. Наприклад, висока варіативність показників сонячної та вітрової енергетики вказує на залежність цих джерел від погодних умов (табл.3.1). Це необхідно враховувати при плануванні та розробці стратегій інтеграції ВДЕ в енергетичну систему, забезпечуючи резервні потужності та гнучкість управління. Врахування ризиків допоможе зменшити негативні наслідки непередбачуваних подій та підвищити стійкість енергетичного сектору.

Таблиця 3.1 - Статистика результатів Монте-Карло

Назва	Середнє	Стандартне відхилення	Мінімум	Максимум
Атомна енергетика	0.594046	0.041898	0.476810	0.708450
Вітрова енергія	0.593915	0.049073	0.458587	0.755928
Сонячна енергія	0.502564	0.048071	0.376747	0.646314
Геотермальна	0.408567	0.049022	0.273922	0.587989
Біоенергетика	0.624287	0.038300	0.511560	0.736693
Гідроенергетика	0.525565	0.052729	0.410381	0.701031
Вугілля	0.434441	0.030400	0.315442	0.525531
Природний газ	0.548358	0.050861	0.431600	0.734119

Джерело: розраховано автором

Атомна енергетика: баланс між потужністю та викликами. Атомна енергетика в Україні має високі та стабільні показники (середній TOPSIS Score - 0.594, стандартне відхилення - 0.042), що підтверджує її роль як основного гаранта енергетичної безпеки. АЕС забезпечують базове навантаження енергосистеми, генеруючи значні обсяги електроенергії з мінімальними викидами парникових газів. Проте, подальший розвиток атомної енергетики стикається з низкою обмежень. Будівництво нових АЕС є надзвичайно капіталомістким та тривалим процесом. Крім того, існує проблема забезпечення ураном, ресурс якого є обмеженим та географічно концентрованим. Питання безпеки експлуатації АЕС та поводження з радіоактивними відходами також потребують пильної уваги. Війна та окупація ЗАЕС додатково актуалізували ці проблеми, підкресливши необхідність диверсифікації та розвитку альтернативних джерел енергії. Таким чином, атомна енергетика залишатиметься важливим елементом енергетичного балансу України, але її частка навряд чи суттєво зростатиме в майбутньому.

Наочно структуру та співвідношення різних джерел енергії в українському енергетичному секторі демонструє наступна візуалізація (рис. 3.2), яка відображає поточний розподіл генеруючих джерел енергії та їх внесок у загальний енергетичний баланс держави.



Рисунок 3.2 – Розподілу часток джерел енергії в Україні
Джерело: розраховано автором на основі даних [39]

Вітрова енергетика: невикористаний потенціал. Вітрова енергетика посідає друге місце за потенціалом (середній TOPSIS Score - 0.594, стандартне відхилення - 0.049), демонструючи високу ефективність та перспективність. Україна має значний невикористаний потенціал вітряної енергії, особливо в прибережних районах та на півдні країни. Проте, розвиток галузі стримується низкою факторів, таких як нестабільність законодавства, обмежений доступ до фінансування та необхідність модернізації електромереж (рис. 3.1). Подолання цих бар'єрів дозволить суттєво збільшити частку вітряної енергії в енергетичному балансі України.

Сонячна енергетика: точкові рішення та перспективи зростання. Сонячна енергетика має гарні показники (середній TOPSIS Score - 0.503), але характеризується високою залежністю від погодних умов (стандартне відхилення - 0.048). Спостерігається значне збільшення встановленої потужності сонячних електростанцій в останні роки, що свідчить про зростання інтересу до цього джерела енергії. Проте, мінливість сонячної генерації обмежує її роль в забезпеченні базового навантаження. Розвиток технологій зберігання енергії та "розумних" мереж є ключовим для подальшого зростання частки сонячної енергетики. Децентралізована генерація на основі сонячних панелей на дахах будівель має значний потенціал для забезпечення енергетичних потреб домогосподарств та зменшення навантаження на централізовану енергосистему.

Біоенергетика: шлях до енергетичної незалежності. Біоенергетика демонструє найвищий потенціал серед ВДЕ (середній TOPSIS Score - 0.624, стандартне відхилення - 0.038). Аграрний потенціал України створює сприятливі умови для розвитку цього напрямку. Використання сільськогосподарських відходів, енергетичних культур та інших видів біомаси може суттєво зменшити залежність від імпорту енергоресурсів та сприяти розвитку сільських територій. Широкий спектр технологій переробки біомаси (спалювання, газифікація, анаеробне бродіння) дозволяє отримувати різні види енергії — від тепла до електроенергії та біопалива.

Геотермальна енергетика: локальні перспективи. Геотермальна енергетика має обмежений загальнонаціональний потенціал (середній TOPSIS Score - 0.409), але може бути ефективним рішенням для окремих регіонів з високою геотермальною активністю, таких як Закарпаття. Використання геотермальної енергії для опалення та гарячого водопостачання може знизити залежність від традиційних джерел енергії та сприяти розвитку місцевої економіки. Приклад Ісландії, де геотермальна енергія є основним джерелом енергії, демонструє потенціал цього напрямку.

Традиційні джерела енергії: час для трансформації. Традиційні джерела енергії, такі як вугілля та природний газ, поступово втрачають свою

привабливість в Україні. Вугільна енергетика має найнижчі показники ефективності (середній TOPSIS Score - 0.434) через значний негативний вплив на довкілля та здоров'я населення, а також низьку економічну ефективність.

Природний газ, хоча і має відносно високий потенціал (середній TOPSIS Score - 0.548), створює ризики для енергетичної безпеки через залежність від імпорту та коливання цін на світових ринках. Війна в Україні додатково загострила цю проблему, підкресливши необхідність диверсифікації та розвитку власних джерел енергії.

Для більш точного та ефективного планування розвитку енергетичного сектору необхідно проводити аналіз на регіональному рівні, враховуючи унікальні особливості кожної області. Це включає адаптацію критеріїв оцінки та їх ваг до конкретних умов, таких як наявність природних ресурсів, стан інфраструктури, рівень розвитку промисловості та соціальні потреби. Наприклад, хоча атомна енергетика в цілому має високі показники, її розвиток в окремих регіонах може бути обмежений через відсутність відповідної інфраструктури або негативне ставлення місцевого населення. Аналогічно, вітрова та сонячна енергетика мають різний потенціал в залежності від кліматичних умов та географічного розташування.

Регіональний підхід до оцінювання джерел енергії дозволить врахувати не лише економічні та екологічні аспекти, але й соціальні та політичні фактори. Наприклад, в деяких регіонах пріоритетом може бути створення нових робочих місць, тоді як в інших — зменшення залежності від імпорту енергоресурсів або розвиток "зеленої" економіки. Врахування цих факторів допоможе розробити збалансовану енергетичну стратегію, що відповідає потребам кожного регіону та країни в цілому.

Таким чином, проведене дослідження та отримані результати створюють базу для подальшого поглибленого аналізу на регіональному рівні. Диференційований підхід до оцінки джерел енергії з урахуванням специфіки кожної області дозволить розробити більш ефективні та цілеспрямовані стратегії розвитку енергетичного сектору України. Отримані результати моделювання

служать важливим інструментом для прийняття обґрунтованих рішень на рівні влади, допомагаючи визначити пріоритетні напрямки розвитку енергетики та оптимізувати розподіл ресурсів.

Наприклад, на основі проведеного аналізу та наявних статистичних даних можна зробити прогноз щодо розвитку енергетичного сектору України до 2030 року. Статистичні дані за період 2010-2023 років демонструють поступове зниження загального споживання енергії та повільне, але стабільне зростання частки відновлюваних джерел енергії (рис. 3.3). При збереженні цієї тенденції та посиленні впровадження джерел енергії з високими показниками за методом TOPSIS можна очікувати суттєвих змін в енергетичному балансі країни.



Рисунок 3.3 – Динаміка виробництва електроенергії

Джерело: розраховано автором на основі даних [39]

За прогнозними оцінками, частка вітрової енергетики може зрости до 15-20% від загального енергетичного міксу, а сонячної - до 12-15%. Це призведе до значного скорочення імпорту електроенергії. Якщо у 2023 році імпорт складав 103,4 млрд кВтгод, то до 2030 року очікується його зниження приблизно до 60 млрд кВтгод, що становитиме скорочення на 42%. Таке зменшення залежності від імпорту матиме позитивний вплив на енергетичну безпеку країни та її економічну стабільність.

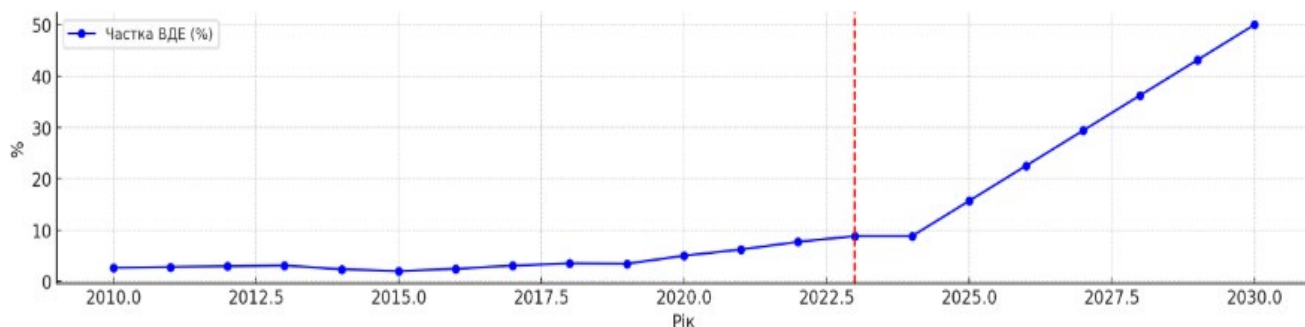


Рисунок 3.4 – Динаміка відновлювальних джерел
Джерело: розраховано автором на основі даних [39]

Особливо важливим аспектом прогнозованих змін є очікуване скорочення викидів CO₂ (рис. 3.5). Аналіз історичних даних показує, що в 2023 році викиди становили 105 млн тонн. При оптимізації енергетичного міксу відповідно до результатів TOPSIS-аналізу, до 2030 року можна очікувати зниження викидів до приблизно 50 млн тонн. Таке скорочення викидів не лише сприятиме виконанню міжнародних зобов'язань України щодо боротьби зі зміною клімату, але й матиме позитивний вплив на якість повітря та загальний екологічний стан в країні.

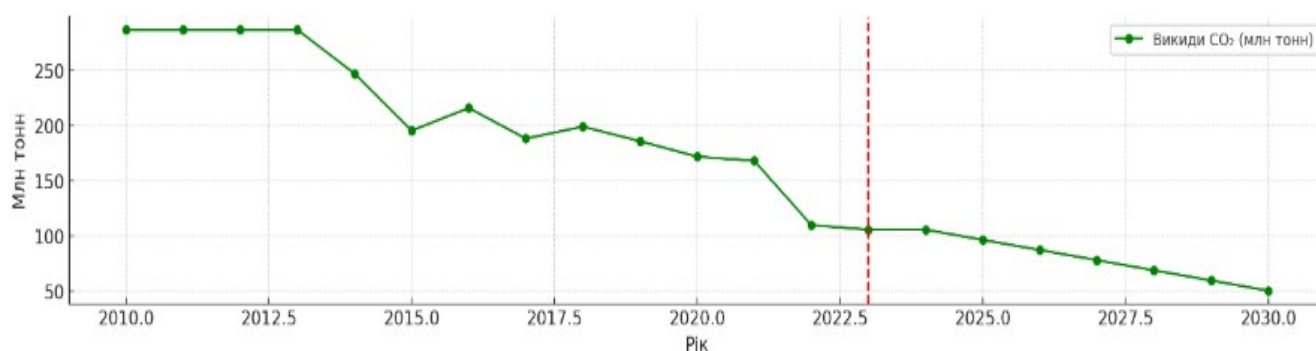


Рисунок 3.5 – Динаміка викидів CO₂
Джерело: розраховано автором на основі даних [39]

Важливо відзначити, що такі зміни в енергетичному секторі матимуть широкий спектр позитивних наслідків для економіки та суспільства. Розвиток відновлюваної енергетики сприятиме створенню нових робочих місць, залученню інвестицій та розвитку локального виробництва енергетичного обладнання. Очікується, що витрати на імпорт енергоносіїв можуть скоротитися на 30-40%, що позитивно вплине на торговельний баланс країни та енергетичну незалежність.

Однак для реалізації такого оптимістичного сценарію розвитку необхідно забезпечити системний підхід до трансформації енергетичного сектору. Це

включає удосконалення нормативно-правової бази, модернізацію енергетичної інфраструктури, розвиток систем накопичення енергії та впровадження сучасних технологій управління енергосистемами. Особливу увагу слід приділити питанням підготовки кваліфікованих кадрів та розвитку наукового потенціалу в енергетичній галузі.

Результати проведеного багатокритеріального аналізу та прогнозування вказують на значний потенціал для трансформації енергетичного сектору України у напрямку більшої сталості та ефективності. війна внесла суттєві корективи в розвиток енергетичного сектору України. Проте, прогнозування подальших тенденцій потребує врахування як довгострокових цілей сталого розвитку, так і нових викликів, пов'язаних з війною та її наслідками. Адаптація енергетичної стратегії до змінених умов є ключовим завданням для забезпечення енергетичної безпеки та сталого розвитку України в майбутньому. Важливо провести додаткові дослідження для оцінки впливу війни на різні сегменти енергетичного сектору та розробити відповідні заходи для мінімізації негативних наслідків та максимізації можливостей, що відкриваються в процесі післявоєнного відновлення.

З огляду на ці нові реалії, прогнозні оцінки, потребують корекції. Руйнування інфраструктури, зміни в структурі споживання енергії та нові геополітичні умови впливають на темпи розвитку різних джерел енергії та їх частку в енергетичному балансі. Наприклад, хоча вітрова та сонячна енергетика залишаються перспективними напрямками, їх розвиток може сповільнитися через обмежений доступ до фінансування та необхідність відновлення пошкоджених об'єктів. Водночас, війна може стимулювати розвиток розподіленої генерації та підвищення енергоефективності, оскільки це допоможе зменшити залежність від централізованої енергосистеми та підвищити енергетичну незалежність споживачів.

3.2 Розробка і аналіз сценаріїв підвищення економічного потенціалу енергетичного сектору

Інтеграція традиційних і відновлюваних джерел енергії в операційний процес несе з собою різні виклики і можливості. Модернізація технологічних та регуляторних процесів в енергетичному секторі може допомогти ринкам подолати значні проблеми та використати можливості, що надаються новими технологіями. Існує ряд бар'єрів на шляху інтеграції традиційної та відновлюваної енергетики, а також вищезгаданих технологій на ринку: технологічні бар'єри, регуляторні та ринкові бар'єри, ринкові та конкурентні бар'єри, а також операційні та соціально-психологічні бар'єри. Для того, щоб отримати кваліфікований і стійкий гетерогенний сектор енергопостачання, що складається з різних ресурсів, необхідно досягти нових інструментів і вдосконалень. Це, головним чином, перехід від жорсткого, монополістичного та централізованого до гнучкого, різноманітного, поліцентричного та ліберального ринку енергетичної системи. Таким чином, сучасна енергосистема трансформується від негнучких великомасштабних централізованих режимів до мереж [40].

Для того, щоб мати життєздатний ринок енергії, що складається з різноманітних взаємопов'язаних джерел енергії, необхідно розвивати енергетичний сектор таким чином, щоб вони могли працювати в єдності.

Пропонується запровадити ключові стратегії, які прокладуть шлях до створення досяжної єдиної та універсальної системи енергопостачання між відновлюваними та традиційними джерелами енергії, що разом відкриє можливості для взаємозв'язку цих енергоресурсів. Важливо також заохочувати розвиток енергетичних мереж, які можуть полегшити і спрямувати двосторонній потік енергії, виробленої з різних джерел. Ці мережі мають важливе значення для створення надійної та стійкої енергетичної системи в будь-якому географічному місці. У районах з низьким рівнем вітру або на ізольованих островах інтегровані системи стають більш важливими для енергозабезпечення громад. Ці системи охоплюють усі основні шляхи скорочення викидів при виробництві електроенергії в цих регіонах і можуть відігравати значну роль у декарбонізації енергетичного сектору.

В Україні, враховуючи її географічне положення та кліматичні умови,

особливо актуальним є розвиток інтегрованих енергетичних систем, що поєднують різні види генерації, включаючи традиційні й відновлювані джерела. Такий підхід дозволить забезпечити стабільне енергопостачання, зменшити залежність від імпорту енергоресурсів та підвищити гнучкість енергосистеми. Наприклад, поєднання сонячної та вітрової енергетики з системами накопичення енергії може компенсувати мінливість ВДЕ та забезпечити стабільне енергопостачання протягом доби. Використання біогазових установок може доповнювати інші види ВДЕ, забезпечуючи базове навантаження в періоди низької сонячної та вітрової активності. Розвиток "розумних" мереж та систем управління попитом дозволить оптимізувати споживання енергії та підвищити ефективність енергосистеми [41].

Вивчення економічного потенціалу традиційних та відновлюваних джерел у національному масштабі має важливе значення для розробки рекомендацій щодо державної політики. Кожна національна економіка функціонує як складна екосистема, де зміни в одному сегменті впливають на суміжні. Тому критично важливо оцінювати сталість економічного зростання з огляду на поточні чинники. У переважній більшості країни намагаються збалансувати розвиток традиційних секторів з новими пріоритетами. Особливо це стосується держав, які не мають значних природних енергетичних ресурсів і змушені шукати екологічно стійкі моделі розвитку.

Вирішення проблеми зміни клімату лежить в основі дискусій навколо майбутнього енергетичного сектору та його економічного потенціалу. Емпіричні дані свідчать про те, що за нинішньої політики світ буде віддалятися від шляху декарбонізації, необхідного для досягнення поставлених цілей. Ланцюжок створення вартості всіх джерел енергії значною мірою схильний до політичних та ринкових ризиків, пов'язаних з перехідним періодом. Майже всі сценарії характеризуються повною відмовою від вугілля, значною трансформацією енергетичного сектору в бік відновлюваних джерел енергії та зростаючою електрифікацією кінцевих споживачів, таких як житловий сектор, сфера послуг і транспорт. Важливість ролі, яку відіграє природний газ, схоже, відображає значні

розбіжності в думках, тоді як водень постає як ключовий фактор у різних сценаріях досягнення поставлених цілей. Звичайно, економічний потенціал енергетичного сектору змінюється залежно від обраного шляху переходу до чистої енергетики та декарбонізації.

Класичні підходи до моделювання добре підходять для розуміння основних технічних та економічних взаємодій між джерелами енергії в рамках кінцевого попиту, але менш здатні належним чином представити нелінійні реакції, які часто характеризують часи соціальних і технологічних змін. Аналіз на основі сценаріїв може забезпечити більш придатну методологію для врахування альтернативного розвитку ринку і політики як щодо попиту на енергію, так і щодо нових викопних і невикопних енергоресурсів. Сценарії не слід ототожнювати з прогнозами, оскільки не існує апіорі найкращого з них; і вони не повинні бути просто описовими, оскільки представляють альтернативні стани природи. Більш корисна роль сценаріїв полягає в тому, що вони є інструментами розповіді для побудови полів бачення, а отже, використовуються для розробки дорожніх карт, спрямованих на досягнення певного майбутнього. Залежно від типу рішення, що приймається, можна передбачити як директивні, так і дослідницькі сценарії. Нарешті, хоча класичне сценарне планування можна кваліфікувати як тривалий і складний наслідок звичайної природної інтуїції, теоретичні дослідження значною мірою підтримують ідею про те, що сценарії не є вільними від когнітивних обмежень, упереджень та обмежень. Таким чином, настійно рекомендується працювати в мультимодельному міждисциплінарному середовищі.

Хоча завжди підкреслюється важливість якісних сюжетних ліній, інтерес поступово зміщується в бік послідовних і розроблених процедур кількісної оцінки та побудови сценаріїв, особливо на рівні сценаріїв. Їх можна розрізнити наступним чином: якісні дослідження, дослідження за допомогою моделей та кількісні мультимодельні дослідження. Загальна структура має відповідати структурі концепції: подібно до концепцій, прийнятих різними ініціативами, мета полягає у створенні загального інтегрованого погляду на ретроспективу минулого, погляд на сьогоднішній день та перспективи майбутнього основних

проблемних викликів. Наразі теперішні та майбутні структури підтримки політики на основі моделей розподілені між різними частинами ієрархії, розпорошені по різних установах. Спільним прагненням має бути залучення урядів до узгодженого процесу планування. Аналогічна роз'єднаність позначається на приватних форумах, орієнтованих на події і, особливо, на короткозорий бюджет, включаючи корпоративні енергетичні та пов'язані з ними виробничі сектори, які не бачать перспективи і орієнтовані на бюджет. Їм необхідно визнати несподівані шляхи поширення низьковуглецевих енергетичних технологій та їхній критичний вплив на їхнє конкретне бізнес- середовище. Надійні стратегічні напрямки можуть виникнути завдяки спеціальному плануванню сценаріїв, починаючи від середньо- та довгострокової політичної перспективи і формування майбутніх стимулів, і закінчуючи перспективою на індивідуальному рівні та завданням розвитку організаційної здатності до освоєння та адаптації [42].

Існує декілька галузей соціальних, економічних та інженерних дисциплін, які різною мірою задіяні та формують основу теорії та практики сценарного аналізу. Так чи інакше, зростання джерел, що сприяють формуванню ефективних методів використання сценаріїв як основи для розробки не тільки організаційної стратегії і тактики, а й державних програм у сфері довгострокового розвитку, залишається недостатнім. Це особливо важливо для енергетичного сектору, де стратегічні рішення розробляються на горизонт 20 і більше років, а також здійснюється календарне планування значних і довготривалих проектів.

Необхідно продовжувати дискусію про взаємозалежності між різними шляхами економічного зростання, переходами до відновлюваної та традиційної енергетики. Такий перехід створює як унікальні можливості, так і серйозні виклики, охоплюючи питання економічної стабільності, захисту довкілля та соціальної справедливості.

Рекомендації призначені для політиків, промисловців, зацікавлених сторін та інвесторів:

Для уряду ключовими завданнями є:

- Проведення комплексної оцінки екологічного дефіциту з метою розробки ефективної політики захисту навколишнього середовища
- Впровадження механізмів економічної відповідальності, які дозволяють ідентифікувати галузі, що спричиняють найбільші екологічні проблеми
- Врахування балансу між економічним зростанням, відновлюваними та невідновлюваними джерелами енергії при формуванні економічної політики
- Забезпечення донесення цілісних рішень до громад та надання інформації про управління потенційними компромісами

Для промисловців, стейкхолдерів та інвесторів пріоритетними напрямками є:

- Підтримка та розвиток екологічно відповідального підприємництва
- Нарощування інвестицій у "зелену" та відновлювану енергетику
- Проведення досліджень з підвищення громадської обізнаності щодо екологічних питань
- Розширення ринку екологічно чистих технологій

Для створення більш сталої та екологічно чистої економіки необхідна комплексна структурна трансформація. Ця трансформація має базуватися на науково-дослідницьких розробках та інноваціях. Важливо створити відповідні фізичні, людські та організаційні механізми для реалізації проектів у сфері відновлюваної енергетики, формування нових ринків та забезпечення інвестиційної підтримки.

Досягнення балансу між економічним розвитком та екологічною стійкістю вимагає послідовних, науково обґрунтованих та комплексних рішень від усіх учасників економічної системи.

Енергетика, будучи фундаментом будь-якої економіки, потребує стратегічного підходу до розвитку, особливо в умовах глобальних змін та місцевих викликів. Україна, враховуючи поточну геополітичну ситуацію та необхідність модернізації енергетичного сектору, повинна зосередитися на диверсифікації джерел енергії та прискореному розвитку відновлюваних джерел

енергії.

Результати моделювання, представлені в розділі 3.1, вказують на перспективність розвитку таких видів ВДЕ в Україні:

Біоенергетика. Високий агропромисловий потенціал України створює сприятливі умови для розвитку біоенергетики. Використання сільськогосподарських відходів, енергетичних культур та іншої біомаси дозволить не лише виробляти електроенергію, тепло та біопаливо, але й стимулювати розвиток сільських територій та створювати нові робочі місця. Державна підтримка у вигляді субсидій, податкових пільг та спрощення дозвільних процедур буде сприяти залученню інвестицій в цей сектор.

В Україні біоенергетика має значний потенціал завдяки розвиненому сільському господарству та наявності значних біоресурсів. За даними UABIO, сумарний енергетичний потенціал виробництва біогазу/біометану в Україні оцінюється у 21,8 млрд. куб. метрів на рік. Це відкриває можливості не лише для заміщення природного газу у виробництві тепла та електроенергії, але й для виробництва біопалива для транспортного сектору та навіть експорту біометану до країн ЄС.

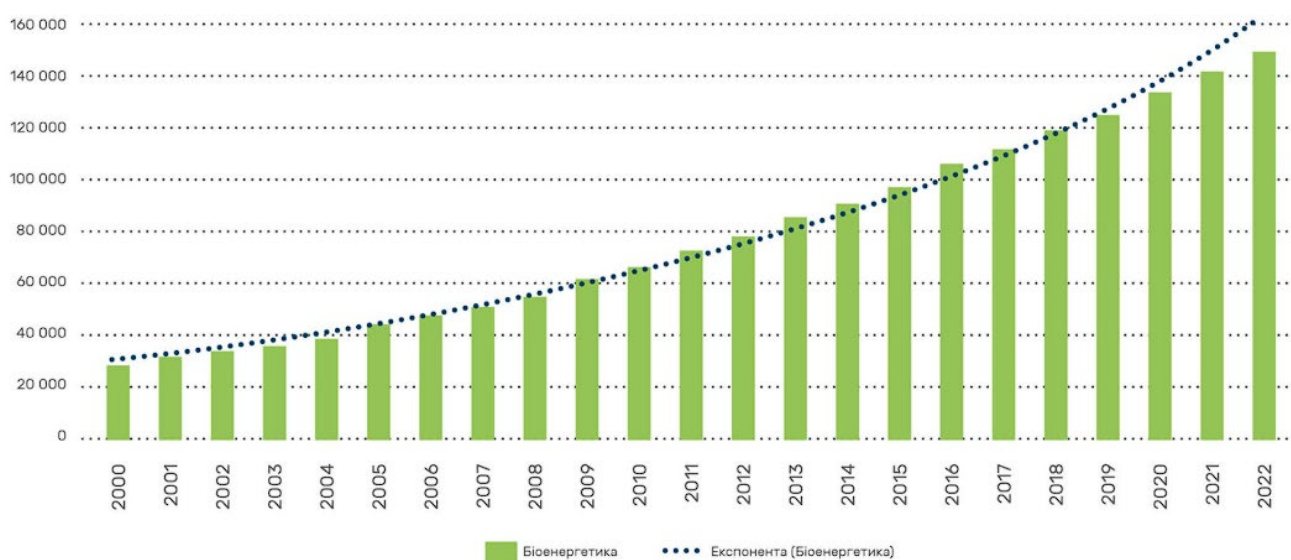


Рисунок 3.6 –Потужність електрогенерації з біомаси у світі, МВт
Джерело: [43]

Згідно з Національним планом дій з відновлюваної енергетики до 2030 року, біоенергетика повинна відігравати ключову роль у досягненні цільових

показників частки ВДЕ в енергобалансі України. Зокрема, до 2030 року частка біомаси та біогазу в секторі теплопостачання має становити 81%, виробництво електроенергії з біомаси збільшитися до 3850 ГВт·год, а споживання рідкого біопалива в транспортному секторі досягти 420 тис. т н.е. та 0.5 тис. т н.е. біометану [43].

Вітроенергетика. Україна має значний вітроенергетичний потенціал, особливо в прибережних регіонах та на півдні. Для його реалізації необхідно модернізувати електромережі, спростити процедури підключення ВЕС та забезпечити прозорі та стабільні умови для інвесторів.

Сонячна енергетика. Сонячна енергетика має перспективи як для великих сонячних електростанцій, так і для розподіленої генерації на дахах будинків. Стимулювання встановлення домашніх СЕС та розвиток "розумних" мереж допоможуть збільшити частку сонячної енергії в енергетичному балансі та підвищити енергонезалежність домогосподарств.

Геотермальна енергетика. Хоча загальнонаціональний потенціал геотермальної енергетики в Україні обмежений, її розвиток доцільний в окремих регіонах з високою геотермальною активністю.

Щодо традиційних джерел:

Вугілля. Необхідно поступово зменшувати частку вугілля в енергетичному балансі через його негативний вплив на довкілля та здоров'я. Модернізація існуючих ТЕС та впровадження технологій очищення викидів можуть бути тимчасовими рішеннями, але в довгостроковій перспективі вугілля має бути заміщене чистішими джерелами енергії.

Природний газ. Диверсифікація поставок та розвиток власного видобутку допоможуть зменшити залежність від імпорту газу. У перехідний період газ може відігравати важливу роль, але в майбутньому його споживання повинно скорочуватися.

Ядерна енергетика. Ядерна енергетика може зробити важливий внесок у декарбонізацію світових секторів електроенергетики та теплоенергетики. Вона все частіше розглядається як низьковуглецеве джерело енергії завдяки низькому

рівню викидів парникових газів протягом усього життєвого циклу. Атомна енергетика може забезпечити надійне, стабільне виробництво електроенергії, оскільки вона не залежить від погодних умов і споживає незначну кількість палива. Новітні атомні електростанції, які стануть доступними в найближчі десятиліття, будуть спроектовані таким чином, щоб виробляти постійну потужність базового навантаження. Удосконалені реактори матимуть кращі функції безпеки і можуть бути більш економічними, ніж реактори, що використовуються зараз. Це може забезпечити більш привабливі інвестиційні можливості і знизити витрати на електроенергію. Збереження існуючих АЕС та підвищення їх безпеки є важливими, але будівництво нових АЕС потребує ретельної оцінки ризиків та витрат.

Енергетичне майбутнє сповнене невизначеностей. Тому важливо розробляти гнучкі стратегії, які дозволять Україні адаптуватися до змін та використовувати нові можливості. Сценарне планування допоможе врахувати різні можливі варіанти розвитку подій та підготуватися до майбутніх викликів. Війна в Україні підкреслила критичну важливість енергетичної незалежності та розвитку розподіленої генерації. Для успішної трансформації енергетичного сектору необхідна тісна співпраця між усіма зацікавленими сторонами та залучення міжнародних партнерів.

Важливим аспектом планування енергетичного переходу є оцінка та управління ризиками. Енергетичний сектор України стикається з низкою ризиків, пов'язаних з війною, економічною нестабільністю, зміною клімату та технологічними змінами. Сценарне планування, що враховує ці ризики, допоможе розробити більш стійкі та адаптивні стратегії. Особливу увагу слід приділити забезпеченню надійності енергопостачання в умовах війни та можливих надзвичайних ситуацій. Диверсифікація джерел енергії, розвиток розподіленої генерації та створення резервних потужностей є ключовими заходами для підвищення енергетичної безпеки України. Крім того, важливо враховувати соціально-економічні наслідки енергетичного переходу для різних груп населення та розробляти механізми соціального захисту вразливих верств населення. Етичні

аспекти енергетичної політики також повинні бути враховані. Прозорість, підзвітність та громадська участь у процесах прийняття рішень є важливими для забезпечення справедливого та ефективного енергетичного переходу.

Інновації та дослідження в енергетиці є життєво важливими для просування галузі до більш безпечного та екологічно сталого майбутнього. Урядам та регуляторним органам необхідно розробити політичну та нормативно-правову базу, яка б краще сприяла розробці та впровадженню майбутніх енергетичних технологій. Створення сприятливого середовища для інновацій може бути досягнуто за допомогою низки регуляторних стимулів і механізмів фінансування. Зацікавлені сторони, включаючи уряд, промисловість та наукові кола, відіграють важливу роль у формуванні політики та обмежень, в рамках яких розробляються ринкові правила, такі як визначення стандартів. В умовах постійного технологічного розвитку нагляд за технологіями і стандартами повинен бути гнучким. Важливе значення для майбутніх енергетичних технологій мають міждисциплінарні досягнення в матеріалознавстві та нанотехнологіях, пов'язані з трансформацією матеріалів і діагностичних інструментів, що уможливають мікроінженерію та мініатюризацію для контролю на квантовому рівні [44].

Широкий спектр політик і методів у різних країнах і регіонах є очевидним: різні інвестори, різні структури управління, різні рівні регулювання, різні стандарти і різне сприйняття громадськістю. Поряд з технологічним розвитком, міжнародне співробітництво повинно розвивати синергію в політиці та стандартах, які долають бар'єри для бізнесу. Тематичні дослідження також показують, що така політика та регуляторні рамки повинні взаємодіяти з громадськістю та бути відомими їй, щоб відповідати завданням сприяння розвитку нових технологій та вирішенню виявлених національних і міжнародних проблем, пов'язаних з енергетичною безпекою та навколишнім середовищем. Перед регуляторними органами та політиками стоїть завдання налагодити зв'язок з громадськістю шляхом розробки доступних механізмів залучення та інформування, а також проведення навчання як для керівників, так і для громадськості. Насамкінець, політика або стратегія приймаються в деяких

куточках світу; вони не відбуваються у відірваній один від одного манері. Вони формуються в складній павутині науково-технічних процесів, соціальних конструкцій, міжнародних переговорів та імплементаційних угод.

Спектр рішень щодо можливостей і викликів, згаданих вище, зростає, і це надихаючий час інноваційного мислення для політики, промисловості та державного сектору. Якщо перехід буде здійснено кваліфіковано, він призведе до глибокої декарбонізації світової економіки та суспільства з централізованими, децентралізованими та незалежними постачальниками енергетичних послуг, які працюватимуть гармонійно та динамічно. Однак загрози та бар'єри на шляху такого переходу також зростають і стають дедалі складнішими.

Технологічні обмеження та недоліки також є значною перешкодою для впровадження майбутніх енергетичних технологій. Економічні проблеми, такі як недостатні інвестиції та величезні капітальні витрати, також мають велике значення. Розробники, інвестори та споживачі можуть зіткнутися з технічними проблемами, пов'язаними з розробкою, переходом та інтеграцією нових енергетичних систем на ринок. Також існують труднощі, пов'язані з інфраструктурою системи, включаючи, але не обмежуючись цим, модернізацію, резервування та надійність. Однак відсутність інфраструктури може призвести до появи економічних стимулів для створення та впровадження нових системних рішень. Проблема виникає під час переходу від однієї системи до іншої: хоча існує набір технологій, обмежена інфраструктура може означати високі капітальні витрати. Капіталістична система також є значним бар'єром, оскільки вона надає перевагу усталеним технологіям.

Залучення громадськості та громадська відповідальність мають вирішальне значення як для стимулювання інновацій, так і для забезпечення суспільної згоди на створення нових електростанцій та енергетичної інфраструктури. Деяких людей найбільше турбує вартість майбутніх цін на енергоносії, тоді як інші просто більше зацікавлені у впровадженні нових потужних технологій. Різні дослідження показують, що рівень обізнаності та залучення громадськості в більшості випадків залишається дуже низьким [45].

Ці бар'єри на шляху поширення нових енергетичних технологій не є нездоланими, але потребують підвищення рівня обізнаності та освіти щодо можливостей і засобів змін. Тематичні дослідження зусиль, спрямованих на конкретні технології в рамках попередньої та поточної урядової практики, показують розмаїття спільних зусиль, які можуть стати рушійною силою для подолання цих бар'єрів. Подолання бар'єрів, визначених вище, насамперед вимагає зворотного зв'язку від усіх залучених сторін і зацікавлених осіб, які співпрацюють задля успішного переходу. Через те, що ці бар'єри можна переносити, будь-які стратегії їх подолання повинні бути зосереджені на контекстуалізованих спільних дослідженнях і розробках, спрямованих на пошук рішень, які, ймовірно, забезпечать найбільшу соціальну та економічну вигоду. Важливо оцінити шлях, яким розвиваються такі технології, але також звернути увагу на технології, що рухаються вперед з нинішньої позиції. На противагу цьому, технології, які, найімовірніше, забезпечать трансформаційний потенціал у майбутньому, мають обмежену підтримку або навіть стикаються з прозорими бар'єрами на шляху їхнього розвитку та впровадження. Такі технології вважаються "пасткою, в якій опинилися курка і яйце" або мають характеристики так званої "злої проблеми". Враховуючи стратегічну важливість ефективного підходу до енергетики у боротьбі зі зміною клімату, в майбутньому пріоритет слід надавати дослідженням і розробкам, що посилюють інноваційну систему для пошуку рішень для потенційно глибоких технологічних зрушень в енергетичних системах.

3.3 Оцінювання потенційних напрямків розвитку енергетичного сектору

Наразі суспільство переживає період стрімкого технологічного розвитку. Енергетика є однією з рушійних сил, що підтримують цей розвиток. Характер енергетичного сектору розвивався протягом багатьох століть. З самого початку основними джерелами енергії були тверді види палива, переважно деревина, а

інші види енергії використовувалися лише в незначній мірі. З часом енергетичний сектор значно розширився, і з'явилися передові енергетичні технології

Електроенергетична галузь за останні 20 років зазнала значних змін, пов'язаних з трансформацією та лібералізацією ринків електроенергії. Лібералізація мереж була спрямована на підвищення прозорості тарифів шляхом руйнування корисливих інтересів, підвищення ефективності сектору, пропонування нових форм тарифоутворення, надання споживачам доступу до кількох постачальників послуг та впровадження сучасних технологій. Тому в інтересах сталого розвитку тенденції в енергетичному секторі в процесі використання технологій слід розглядати в контексті кореляції зі сферою економіки. Зміна клімату та все більша поява відновлюваних джерел енергії, вибухове зростання децентралізованого енергопостачання, поширення інноваційних технологій підтримки стабільності енергосистем суттєво впливають на економічні та геополітичні аспекти енергозабезпечення. Безсумнівно, в майбутньому на передній план розвитку енергетичного сектору вийдуть такі напрямки та інноваційні рішення, як використання відновлюваних джерел енергії, подальший розвиток "розумних" мереж, різке збільшення обсягів електротранспорту, вдосконалення існуючих видів транспортування електроенергії. При цьому основними тенденціями є декарбонізація електроенергетики та депластифікація теплової енергетики. У контексті енергозабезпечення кінцевих споживачів все більшого розвитку набувають малі джерела відновлюваної енергії, що передбачає відповідні аспекти біоекономіки для бізнесу. Трансформація енергетики та суміжних секторів економіки неминуче вплине на транспортування електроенергії, зокрема на традиційне приєднання центральних генеруючих потужностей до розподільчих та мережевих компаній [46].

Різне збільшення темпів зростання енергоспоживання в найближчі десятиліття може призвести до значного розширення географії енергетичної інфраструктури, що може бути реалізовано лише з ініціативи та за рахунок кінцевого споживача. Енергетичні ресурси залишаються основним фактором

забезпечення економічного зростання як у розвитку, так і в зростанні країн з ринками, що формуються, які страждають від дефіциту енергоресурсів. Структура споживання електроенергії суттєво змінюється. Збільшується частка нетрадиційних видів паливно-енергетичних комплексів, стабільно зростає частка генерації, суттєво збільшується реактивний резерв через незручність перенесення електричних навантажень у часі та просторі.

Цікаво відзначити у зв'язку з цим стійке зростання інтересу споживачів та попиту на дані про поточну та прогнозовану ситуацію з генерацією; у напрямку зменшення різниці між споживанням вологи та зарезервованою кількістю для основних видів генерації; з урахуванням неформальності повітря окремих електростанцій за місяць у зимовий період, що наразі недоступно для операційних систем. Змінюється топологія електричної мережі. Відбувається перерозподіл навантаження та генерації між енергосистемами як всередині країни, так і між країнами, зниження напруженості енергосистем, підвищення керованості перетоків електричної енергії при нормальній роботі ділянок електромережі та в аварійних ситуаціях у всіх секторах енергомосту.

Сталий розвиток в енергетичному секторі нерозривно пов'язаний з технічними інноваціями, оскільки розумне використання технологій може зробити енергетичні системи більш ефективними, менш ресурсоемними та екологічно чистими. Існує кілька викликів, що стоять перед енергетичним сектором, які роблять потребу в інноваціях ще більш нагальною. Серед них - триваюча зміна клімату та зростання вартості енергії, що призводить до індивідуальної, суспільної, регіональної та глобальної вразливості.

Декарбонізація зазвичай визначається як фундаментальний процес, спрямований на зниження вуглецевої інтенсивності економіки. Ключовий аспект цього процесу полягає у складній якісній трансформації існуючої енергетичної інфраструктури, що призводить до помітного та суттєвого зниження вуглецевої інтенсивності, пов'язаної з виробництвом електроенергії. Як наслідок, це тягне за собою значне витіснення нафти і вугілля з енергетичної галузі, а також сприяє переведенню численних енергетичних навантажень з інших видів викопного

палива на електроенергію. Крім того, в рамках загальної стратегії декарбонізації різні сектори, включаючи транспорт, гірничодобувну промисловість, нафтохімію та низькотемпературну теплоенергетику, можуть бути поступово електрифіковані в різному ступені. Цей трансформаційний процес має потенціал докорінно змінити спосіб роботи цих секторів, зробивши значний крок до більш сталого та екологічно чистого довкілля. Однак важливо визнати, що процес декарбонізації значною мірою залежить від ефективності виробництва електроенергії. Варто зазначити, що лише одна шоста частина загального споживання первинної енергії припадає на 15-20% виробництва електроенергії. Дивовижно, але половина нафтових ресурсів використовується виключно для стаціонарного виробництва електроенергії, ще чверть - для споживання газу, а п'ята частина - для громадського споживання. Очевидно, що виробництво електроенергії відіграє ключову роль у сфері декарбонізації, оскільки воно має потенціал для досягнення значних результатів у зменшенні викидів вуглецю. Тим часом, різні енергоємні галузі промисловості значною мірою залежать від теплової енергії, отриманої за рахунок високих температур. Перехід до декарбонізації вимагає ретельних заходів у цих галузях, спрямованих на заміну традиційних джерел енергії більш стійкими альтернативами [47]. Впровадження декарбонізації на інфраструктурному рівні з одночасним збільшенням коефіцієнта використання потужності вітрових і сонячних електростанцій, а також застосуванням методів зберігання енергії та управління навантаженням призводить до зростання дефіциту електроенергії, що корелює зі зростанням попиту на більш чисті джерела енергії. По суті, декарбонізація означає грандіозну зміну підходу до економічного зростання, що в кінцевому підсумку призведе до зменшення залежності від сировини, включаючи енергетичні ресурси. Цей трансформаційний якісний процес матиме глибокий вплив на відокремлення зростання ВВП від одночасної ескалації викидів вуглецевих сполук. Розриваючи традиційний, глибоко вкорінений зв'язок між економічним прогресом і збільшенням споживання ресурсів, декарбонізація прокладає шлях до сталого і процвітаючого майбутнього.

Одним із запропонованих методів обмеження рівня викидів парникових

газів в атмосферу є часткове зменшення викидів шляхом уловлювання та зберігання вуглекислого газу. Зокрема, використання технологій УЗВ дозволяє вловлювати та зберігати викиди CO₂ від енергетики та промисловості в літосфері Землі, тобто в геологічних формаціях. Впровадження цих технологій на практиці може значно скоротити викиди від електростанцій, що працюють на викопному паливі, та інших промислових підприємств. Однак існує низка проблем, пов'язаних з широким впровадженням УЗВ, таких як економічна ефективність, витрати енергії на відділення та очищення вуглекислого газу, зберігання землі, конфлікт з переробкою екологічно чистої та безвідходної енергії, а також протидія громадськості експлуатації таких установок. Останнім часом розвиток технологій і методологій видалення та зберігання CO₂ спрямований на уловлювання CO₂ з вихлопних газів багатих на CO₂ промислових підприємств і електростанцій, при цьому велика увага приділяється досягненням у технології переробки продуктів згоряння, які виділяють CO₂.

Це більше, ніж природне явище, з надзвичайно високою економічною ефективністю для суспільства. Викиди зберігаються у відносно великих підземних геологічних формаціях на значній глибині від поверхні Землі, де вони можуть зберігатися і герметизуватися в середовищі формацій протягом сотень мільйонів років. Як варіант скорочення викидів парникових газів, УЗВ швидко завойовує повагу з боку різних секторів, керівних організацій та багатьох дослідників. За сприятливих умов викиди можуть бути скорочені в діапазоні від 15 до 52,5 євро/тонну, з потенційним скороченням до 85 євро/тонну електроенергії. Викиди вуглекислого газу були запроваджені на початку 1970-х років, коли виробництво димових газів викидалося в навколишнє середовище як часткове рішення. У 2006 році на Землі були заплановані важливі процедури для 15 радіоактивних об'єктів, що використовують CO₂, з яких чотири підприємства вже розпочали свою діяльність. УЗВ - це нова технологія, яка отримала широке розповсюдження менш ніж за 15-20 років. В деяких часових рамках вважається, що УЗВ відіграватиме важливу роль у сценаріях з низьким рівнем викидів. Загалом, 92 000 Гт CO₂ було збережено в морській воді, щоб уникнути його

наслідків [48].

Штучний інтелект (ШІ) відіграє все більшу роль в енергетиці. Зв'язки між цими двома секторами численні, взаємопов'язані і ведуть до синергетичного підходу, ефективно трансформуючи традиційний енергетичний сектор. Зокрема, ШІ дозволяє оптимізувати і контролювати управління енергією, підвищувати енергоефективність і проводити прогнозоване технічне обслуговування. У системах відновлюваної енергетики ШІ може покращити оцінку ресурсів, проектування, управління силовими електронними перетворювачами, а також збільшити термін служби вітрових турбін і фотоелектричних установок. Він використовується в управлінні електромережами, зокрема, для деяких застосувань, таких як управління мікромережами та зберігання даних. Зараз ШІ досягає рівня, коли в деяких сферах він перевершує людську діяльність, і його технології все частіше виходять на ринок, якщо вже вийшли.

Штучний інтелект має потенціал для оптимізації енергоменеджменту, підвищення енергоефективності та виявлення профілактичного обслуговування, сприяючи енергетичному переходу. Він застосовується в різних сферах, включаючи відновлювану енергетику, управління електромережами та управління будівлями, і значні переваги можуть призвести до зміни існуючих відносин між комунальними підприємствами, постачальниками та споживачами енергії. Виклики, пов'язані зі штучним інтелектом, стосуються конфіденційності даних, якості даних, алгоритмічної упередженості, прозорості та поширення технологічної ерозії. ШІ може призвести до прийняття більш розумних рішень щодо енергетичних активів та енергетичного сектору. ШІ сприяє прискоренню розробки та розгортання декарбонізованих енергетичних систем, стимулюючи сильніші, швидші та вигідніші інновації.

Розумний лічильник містить IoT-модуль, який підключається до мобільних або WiFi мереж. Розумні лічильники - це пристрої Інтернету речей, які здійснили революцію в даних, доступних для енергетичного сектору, оскільки поширення розумних лічильників призвело до збору даних з такою частотою і точністю, які раніше були неможливі. Найсуттєвіший вплив масового впровадження

"розумних" лічильників полягає в детальному моніторингу та звітності в режимі реального часу щодо моделей споживання окремих споживачів енергії. На відміну від аналітики, що базується на історичних, згладжених даних, аналітика, що використовує ці дані, передбачатиме поведінку підгрупи споживачів з безпрецедентним ступенем надійності. В результаті, аналітичні висновки, такі як прогнозні моделі, можуть бути трансформовані і розглядатися як майже 100% достовірні відповіді споживачів, на яких вони базуються. Пристрій Інтернету речей - це фізичне обладнання, що містить міні-комп'ютери. Це "річ", яка за допомогою датчиків і мережевого з'єднання здатна передавати дані на віддалену комп'ютерну систему без втручання людини [49].

Ці пристрої можуть надавати комунальним компаніям дані, які можна обробляти в режимі реального часу, щоб підвищити оперативність реагування, наприклад, підтримуючи кращий і більш послідовний контроль над мережею. Великі масиви даних, зібрані з цих пристроїв, зазвичай аналізуються, серед іншого, і використовуються для прогнозування деградації інфраструктури. За допомогою інтелектуального аналізу даних виявляється часовий патерн даних і автоматично генерується попередження. Потенційно, персональні пристрої Інтернету речей, такі як розумні вилки, можуть дати енергетичним компаніям раннє розуміння намірів споживачів. Маломасштабний IoT може бути частиною стратегій реагування на попит і використовуватися енергетичними прогнозистами і планувальниками для отримання більш детального розуміння того, коли впродовж дня або тижня змінюється попит. Основними проблемами, з якими стикається розгортання великої кількості пристроїв Інтернету речей, є обсяги даних, що генеруються пристроями, а також питання конфіденційності та безпеки даних. З огляду на велику кількість пристроїв, по-перше, виникає значне навантаження на власну IT-інфраструктуру комунального підприємства для обробки та зберігання цих даних. По-друге, існує ймовірність того, що шкідливе програмне забезпечення та ботнети можуть пошкодити дані, що зробить аналітику менш ефективною. Розгортання персональних пристроїв Інтернету речей також пов'язане зі значними проблемами конфіденційності. Це складне питання, що

включає багато аспектів, але в основі своїй стосується прав споживачів щодо використання "їхніх" даних, особливо коли вони не надають інформованої згоди. Правові та етичні рамки навколо цього питання розвиваються, але рішення повинні бути знайдені, оскільки очевидно, що розгортання персональних пристроїв Інтернету речей може принести значну комерційну вигоду для аналітиків, що матиме значну комерційну вигоду для аналітики. З огляду на велику кількість застосувань, "розумні" лічильники в поєднанні з технологією Інтернету речей мають потенціал для трансформації сфери застосування компаративної аналітики в енергетиці.

У найближчі роки світова економіка стане свідком жорсткої конкуренції за енергетичні ресурси. Немає сумнівів, що енергетичне майбутнє, зумовлене конкурентною боротьбою, приховуватиме для нас сюрпризи. Однак важко визначити характер, масштаб і напрямок цих сюрпризів. Їхнє розмаїття дуже широке: від поширення таких енергоефективних технологій, як комбінована теплоенергетика, вдосконалені інтегровані двофазні цикли перетворення, або паливні елементи, до нових можливостей сонячної енергетики, мікрохвильової передачі енергії з космосу, впровадження надпровідності, ядерного ренесансу з появою нових типів і вдосконалених поколінь реакторів на швидких і термоядерних нейтронах і навіть таких екзотичних форм передачі енергії, як Z-розщеплення і мікрровибухи термоядерного синтезу. Високий ступінь необізнаності, який все ще існує щодо майбутнього енергетичного потенціалу і майбутніх науково-технічних потрясінь, тобто сюрпризів, які наукове знання час від часу готуватиме для нас, навряд чи виправдовує радикальну зміну усталеної методології, заснованої на прогнозуванні, що існувала дотепер.

На часі кілька технологічних розробок, які можуть сприяти підвищенню енергоефективності в різних секторах. У будівельному секторі це можуть бути "розумні" термостати і регулятори, які є економічно ефективними і які люди готові використовувати; технологічні вдосконалення термодинамічних огорожувальних конструкцій з можливим автономним електронним контролем теплопровідності і сонячного пропускання; виробництво нових

теплоакумуючих матеріалів, які можуть бути дуже компактними і економічно ефективними при використанні для сезонного зберігання тепла, отриманого від сонця. Вони також можуть сприяти впровадженню нових будівельних конструкцій або модернізації будівель і пов'язаних з ними технологій опалення та охолодження, що сприятиме подальшій економії коштів і підвищенню ефективності. Було висловлено припущення, що нові теплоакумуючі матеріали для холодильних систем також можуть підвищити ефективність. У виробничому секторі, ймовірно, продовжуватимуться дослідження нових і більш ефективних промислових процесів. Багато з них будуть специфічними для конкретного сектору. У деяких матеріальних і хімічних процесах розвиток нанотехнологій має потенціал для скорочення споживання енергії. Початкова енергія, необхідна для переробки матеріалів, іноді нижча, ніж енергія, необхідна для виробництва нового матеріалу з первинних ресурсів, і розробляються нові дешевші і чистіші технології переробки, які дозволять ще більше знизити потребу в енергії. У транспортному секторі потенційними основними технологічними інноваціями є електрифікація транспортних засобів, що дозволить використовувати набагато ширший спектр первинних видів палива, а також технологічний прогрес у виробництві акумуляторів і паливних елементів. Крім самих транспортних засобів, існують технології для вдосконаленого виробництва палива, включаючи нові технології електрохімічного виробництва палива, а також уловлювання та використання вуглецю. Підраховано, що технічний потенціал енергозбереження в будівлях, промисловості та транспорті становить від 10 до 40 відсотків до 2050 року, причому 20 відсотків - і близько двох третин цього потенціалу - припадає на житлові та комерційні будівлі [50]. Ефективне довгострокове збереження енергії вимагає систематичного та інтегрованого набору енергоефективних технологій та послуг. Це також вимагає технологій кінцевого споживання, які допомагають забезпечити зростаючий, додатковий і неформальний попит на енергетичні послуги, зменшуючи при цьому фактично існуючі умови надмірного споживання.

Висновки до третього розділу

На основі проведеного дослідження було сформульовано ряд рекомендацій, спрямованих на вдосконалення компаративної аналітики в енергетичному секторі. Передусім, необхідно посилити інтеграцію технологій обробки великих даних і машинного навчання, що дозволить значно підвищити точність аналізу та ефективність управлінських рішень. Інструменти прогнозного моделювання сприятимуть ідентифікації довгострокових тенденцій розвитку, а також оцінці ризиків і можливостей у процесі переходу до ВДЕ.

Додатково, важливим напрямом є створення інтерактивних аналітичних платформ, які забезпечать зручний доступ до даних і результатів аналізу для зацікавлених сторін, зокрема державних органів, інвесторів та науковців. Такі платформи сприятимуть прозорості процесів прийняття рішень і посиленню взаємодії між різними суб'єктами енергетичного ринку.

Розвиток енергетичного сектору України має базуватися на комплексному підході, що враховує економічні, соціальні та екологічні аспекти. Перехід до ВДЕ не лише сприятиме зменшенню викидів шкідливих речовин, а й стане потужним стимулом для економічного зростання. У процесі розробки сценаріїв слід орієнтуватися на поєднання активної державної підтримки та міжнародного співробітництва.

Результати дослідження свідчать, що оптимізація використання ресурсів та інтеграція відновлюваних джерел енергії дозволять зменшити залежність від імпорту викопного палива, створити нові робочі місця та забезпечити стабільність енергопостачання. Водночас реалізація цих заходів вимагатиме значних інвестицій, модернізації інфраструктури та вдосконалення регуляторної бази. Усі ці аспекти повинні стати основою для стратегічного планування розвитку енергетичного сектору, спрямованого на досягнення цілей сталого розвитку та енергетичної незалежності України.

Принципово важливими складовими успішної трансформації визначено: послідовну модернізацію інфраструктури, впровадження інноваційних технологій

аккумуляції та зберігання енергії, формування сучасних фінансово-економічних механізмів підтримки інвестиційних проєктів. Дослідження чітко демонструє, що ефективна реалізація енергетичної стратегії можлива виключно за умови комплексного підходу, який враховує технологічні, економічні, екологічні та соціальні чинники.

Проведений аналіз також актуалізує глобальний контекст енергетичних трансформацій. Швидке зростання населення, посилення екологічних викликів та необхідність забезпечення сталого розвитку змушують країни активно впроваджувати інноваційні рішення в енергетичній сфері. Для України це означає не лише адаптацію до світових тенденцій, але й формування власної унікальної моделі розвитку енергетичного сектору, яка враховує національні пріоритети та глобальні тренди.

Водночас дослідження не применшує існуючих бар'єрів та викликів на шляху системної трансформації. Подолання технологічних, інфраструктурних, фінансових обмежень вимагає послідовної державної політики, спрямованої на створення сприятливого інвестиційного клімату, стимулювання інновацій та підтримку вітчизняних виробників у сфері відновлюваної енергетики.

ВИСНОВКИ

Проведене дослідження всебічно охоплює теоретичні, методологічні та прикладні аспекти компаративної аналітики економічного потенціалу енергетичного сектору, демонструючи її важливість як інструменту стратегічного управління. У результаті роботи встановлено, що компаративна аналітика відіграє ключову роль у формуванні стратегій сталого розвитку, забезпечуючи об'єктивну оцінку та порівняння традиційних і відновлюваних джерел енергії з урахуванням економічних, екологічних і соціальних факторів.

Компаративна аналітика дозволяє ідентифікувати приховані взаємозв'язки між численними показниками та чинниками, що впливають на функціонування енергетичного сектору. Зокрема, застосування сучасних методів аналізу даних, таких як багатокритеріальний аналіз, прогнозне моделювання та методи машинного навчання, дає змогу формувати обґрунтовані висновки щодо ефективності використання енергетичних ресурсів та оцінювати потенціал їх подальшого розвитку. У роботі розкрито сутність компаративної аналітики як багаторівневого підходу, що охоплює системний аналіз, інтеграцію великих даних, візуалізацію результатів та багатofакторне прогнозування.

Традиційні джерела енергії, такі як вугілля, нафта та природний газ, залишаються основою світового енергетичного балансу. Їхні переваги полягають у високій доступності, розвиненій інфраструктурі та енергетичній щільності. Однак значний екологічний вплив, залежність від геополітичних ризиків і обмеженість запасів суттєво обмежують їх довгострокову перспективність. У дослідженні наголошено, що ефективне використання цих ресурсів потребує модернізації технологій видобутку, транспортування та переробки, а також врахування сучасних екологічних вимог.

Відновлювані джерела енергії мають високий потенціал для сталого розвитку енергетичного сектору. Сонячна, вітрова, гідро- та геотермальна енергетика є екологічно безпечними та сприяють зменшенню викидів парникових газів, підвищенню енергетичної незалежності та якості життя населення. Однак, їхнє широкомасштабне впровадження пов'язане з необхідністю значних

інвестицій у технологічну інфраструктуру, системи зберігання енергії та розвиток розподільчих мереж. Дослідження підтверджує, що розвиток ВДЕ можливий за умов державної підтримки, впровадження фінансових механізмів (зелені облігації, субсидії) та стимулювання інновацій.

У роботі проведено аналіз сучасного стану енергетичного сектору з урахуванням тенденцій глобального та національного розвитку. Встановлено, що ключовими викликами є адаптація до змін клімату, зростання попиту на енергію та впровадження низьковуглецевих технологій. Використання багатокритеріального аналізу дозволило виявити найефективніші напрямки для інвестицій, такі як розвиток ВДЕ, підвищення енергоефективності та цифровізація процесів.

Моделювання економічного потенціалу енергетичного сектору, здійснене в межах дослідження, підтвердило ефективність методології TOPSIS для ранжування джерел енергії за різними критеріями. Зокрема, виявлено, що інтеграція великих даних, статистичних методів і технологій машинного навчання сприяє значному підвищенню точності оцінок, дозволяючи приймати стратегічні рішення в умовах високої невизначеності.

Розроблені сценарії розвитку енергетичного сектору враховують як економічні, так і екологічні аспекти, забезпечуючи баланс між зростанням енергетичного потенціалу та зниженням негативного впливу на довкілля. Особливий акцент зроблено на адаптацію енергетичної системи України до глобальних викликів через стимулювання інновацій, залучення інвестицій та створення сприятливого регуляторного середовища.

Практичні рекомендації включають впровадження інтегрованих підходів до планування, що базуються на багатофакторному аналізі. Це дозволяє формувати стратегії, орієнтовані на підвищення енергетичної ефективності, диверсифікацію джерел енергії, зменшення залежності від імпорту палива та поліпшення екологічної ситуації. Зокрема, запропоновано вдосконалити механізми підтримки інновацій, що включають субсидування R&D, податкові стимули та грантові програми.

Оцінювання напрямів розвитку підтверджує, що інтеграція традиційних і відновлюваних джерел енергії є критично важливою для сталого зростання. Це створює умови для формування конкурентоспроможного, екологічно безпечного та соціально відповідального енергетичного сектору України, який відповідає потребам суспільства та викликам сучасності.

Загалом, результати дослідження формують концептуальну та практичну основу для розробки ефективної енергетичної стратегії, спрямованої на забезпечення довгострокового економічного зростання та сталого розвитку. Запропоновані методологічні підходи та практичні рекомендації дозволяють не лише адаптувати енергетичний сектор до сучасних глобальних викликів, таких як декарбонізація, енергетична безпека та економічна ефективність, але й створюють умови для його технологічного оновлення та інноваційного розвитку. Комплексний підхід, що включає інтеграцію відновлюваних джерел енергії, підвищення енергоефективності, стимулювання інвестицій у зелені технології та цифровізацію процесів, забезпечує конкурентоспроможність національної енергетичної системи на міжнародній арені. Таким чином, виконана робота робить вагомий внесок у формування стратегії сталого розвитку, орієнтованої на гармонійне поєднання економічних, екологічних та соціальних інтересів.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. World Energy Outlook 2023. International Energy Agency. URL: <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2023/executive-summary>
2. Розуміння основних трендів у продакт менеджменті: AI, IoT, Big Data, Blockchain та інші. London Product Academy. URL: <https://www.londonproduct.academy/post/rozuminnya-osnovnih-trendiv-u-produkt-menedzhmenti-ai-iot-big-data-blockchain-ta-inshi>
3. Zhang Y., Shi X., Zhang H., Cao Y., Terzija V. Review on deep learning applications in frequency analysis and control of modern power system. ScienceDirect. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0142061521009686>
4. Shair J., Li H., Hu J., Xie X. Power system stability issues, classifications and research prospects in the context of high-penetration of renewables and power electronics. ScienceDirect. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1364032121003993>
5. Fodstad M., del Granado P.C., Hellemo L. Next frontiers in energy system modelling: A review on challenges and the state of the art. ScienceDirect. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S136403212200168X>
6. Renewables could power almost 80% of Ukraine's economy by 2050, says UN report. United Nations Economic Commission for Europe. URL: <https://unece.org/sustainable-development/press/renewables-could-power-almost-80-ukraines-economy-2050-says-un-report>
7. Екологія, природокористування та охорона навколишнього середовища: прикладні аспекти. Національний технічний університет «Дніпровська політехніка». URL: https://ecology.nmu.org.ua/ua/Studies/Ecology_Environmenal_Management_2023.pdf
8. Тип компаній в енергетичному секторі. Investopedia. URL: https://www.investopedia.com/terms/e/energy_sector.asp
9. The current EU energy policy framework and targets by 2030 and 2050. ResearchGate. URL: https://www.researchgate.net/figure/The-current-EU-energy-policy-framework-and-targets-by-2030-and-2050-Source-own_fig1_350365501

10. The Clean Energy Future Is Arriving Faster Than You Think. The New York Times. URL: <https://www.nytimes.com/interactive/2023/08/12/climate/clean-energy-us-fossil-fuels.html>
11. Renewable Power Generation Costs in 2023. International Renewable Energy Agency. URL: https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2024/Sep/IRENA_Renewable_power_generation_costs_in_2023.pdf
12. Green Finance Market. Market.us. URL: <https://market.us/report/green-finance-market/>
13. Energy and the Economy in Europe. SpringerLink. URL: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-030-86884-0_36
14. European Electricity Review 2024. Ember. URL: <https://ember-climate.org/insights/research/european-electricity-review-2024/>
15. Modeling and Simulation of Energy Systems: A Review. ResearchGate. URL: https://www.researchgate.net/publication/329157494_Modeling_and_Simulation_of_Energy_Systems_A_Review
16. Achakulwisut P., Erickson P., Guivarch C. Global fossil fuel reduction pathways under different climate mitigation strategies and ambitions. Nature. URL: <https://www.nature.com/articles/s41467-023-41105-z.pdf>
17. Wang Q., Guo J., Li R., Jiang X. Exploring the role of nuclear energy in the energy transition: A comparative perspective of the effects of coal, oil, natural gas, renewable energy, and nuclear power. ScienceDirect. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0013935123000828>
18. Achakulwisut P., Erickson P., Guivarch C. Global fossil fuel reduction pathways under different climate mitigation strategies and ambitions. Nature. URL: <https://www.nature.com/articles/s41467-023-41105-z.pdf>
19. Statistical Review of World Energy. Energy Institute. URL: <https://www.energyinst.org/statistical-review#regional-overview>

20. The Role of Gas in Ukraine's Energy Future. Center for Strategic and International Studies. URL: <https://www.csis.org/analysis/role-gas-ukraines-energy-future>
21. Energy Agency. URL: https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2024/Sep/IRENA_Renewable_power_generation_costs_in_2023.pdf
22. Solar. U.S. Department of Energy. URL: <https://www.energy.gov/solar>
23. Wind energy in Europe. Norsk Energi- og Effektråd. URL: <https://nec.no/wind-energy-in-europe-2021-statistics-and-the-outlook-for-2022-2026/>
24. Wind energy in Europe: 2021 Statistics and the outlook for 2022-2026. WindEurope. URL: <https://windeurope.org/intelligence-platform/product/wind-energy-in-europe-2021-statistics-and-the-outlook-for-2022-2026/>
25. Le T.T., Sharma P., Bora B.J., Tran V.D., Truong T.H. Fueling the future: A comprehensive review of hydrogen energy systems and their challenges. ScienceDirect. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0360319923039988>
26. Geothermal energy. Repsol. URL: <https://www.repsol.com/en/energy-and-the-future/future-of-the-world/geothermal-energy/index.cshtml>
27. Deora P.S., Verma Y., Muhal R.A., Goswami C. Biofuels: An alternative to conventional fuel and energy source. ScienceDirect. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2214785321056650>
28. Renewable Energy. U.S. Department of Energy. URL: <https://www.energy.gov/eere/renewable-energy>
29. Energy Mix. Our World in Data. URL: <https://ourworldindata.org/energy-mix>
30. Eriotis N., Vasiliou D. Evaluating the Neoclassical Synthesis in the Context of the Greek Economic Crisis: Historical Foundations. ResearchGate. URL: https://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract_id=4908987

31. Su C.W., Umar M., Shao X., LobonȚ O.R. The race to zero emissions: Can renewable energy be the path to carbon neutrality? ResearchGate URL: https://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract_id=3988110
32. How Artificial Intelligence (AI) is driving decarbonisation. Equans URL: <https://www.equans.com/news/how-artificial-intelligence-is-driving-decarbonisation>
33. Hoang A.T., Foley A.M., Nižetić S., Huang Z. Energy-related approach for reduction of CO₂ emissions: A critical strategy on the port-to-ship pathway. ScienceDirect. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0959652622013841>
34. Delannoy L., Longaretti P.Y., Murphy D.J., Prados E. Peak oil and the low-carbon energy transition: A net-energy perspective. ScienceDirect. URL: <http://surl.li/xiqdyf>
35. Sahoo S.K., Goswami S.S. A comprehensive review of multiple criteria decision-making (MCDM) Methods: advancements, applications, and future directions. Decision Making Advances. URL: <http://surl.li/ohvqkw>
36. Khan S.A. Application of TOPSIS Approach to Multi-Criteria Selection of Wind Turbines for On-Shore Sites. ResearchGate. URL: https://www.researchgate.net/publication/346455258_Application_of_TOPSIS_Approach_to_Multi-Criteria_Selection_of_Wind_Turbines_for_On-Shore_Sites
37. Monte Carlo Simulation: What It Is, How It Works, History, 4 Key Steps. Investopedia. URL: <https://www.investopedia.com/terms/m/montecarlosimulation.asp>
38. Coy D., Malekpour S., Saeri A.K., Dargaville R. Rethinking community empowerment in the energy transformation: A critical review of the definitions, drivers and outcomes. ScienceDirect. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2214629620304461>
39. Data on Energy. Our World in Data. URL: <https://github.com/owid/energy-data>
40. Ukraine energy profile. Market design. International Energy Agency. URL: <https://www.iea.org/reports/ukraine-energy-profile/market-design>

41. Ukraine's Electricity Sector. Baker Institute. URL: <https://www.bakerinstitute.org/sites/default/files/2024-08/20240814-Ukraine%20Electricity%20Sector-WP.pdf>
42. 6 key insights into accelerating the energy transition. World Economic Forum. URL: <https://www.weforum.org/agenda/2022/05/6-key-insights-accelerating-energy-transition/>
43. Біоенергетика у 2023 році: глобальний статистичний звіт Всесвітньої біоенергетичної асоціації (WBA). SAF. URL: <https://saf.org.ua/news/1825/>
44. The Clean Energy Future Is Arriving Faster Than You Think. The New York Times. URL: <https://www.nytimes.com/interactive/2023/08/12/climate/clean-energy-us-fossil-fuels.html>
45. Farghali M., Osman A.I., Chen Z., Abdelhaleem A. Social, environmental, and economic consequences of integrating renewable energies in the electricity sector: a review. Springer. URL: <https://link.springer.com/content/pdf/10.1007/s10311-023-01587-1.pdf>
46. Hoang A.T., Nguyen X.P. Integrating renewable sources into energy system for smart city as a sagacious strategy towards clean and sustainable process. ScienceDirect. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0959652621013809>
47. Rehman A., Alam M.M., Ozturk I., Alvarado R. Globalization and renewable energy use: how are they contributing to upsurge the CO2 emissions? A global perspective. Springer. URL: <http://surl.li/vhntny>
48. Adebayo T.S., Ullah S. Towards a sustainable future: The role of energy efficiency, renewable energy, and urbanization in limiting CO2 emissions in Sweden. Wiley Online Library. URL: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/sd.2658>
49. Al-Shetwi A.Q. Sustainable development of renewable energy integrated power sector: Trends, environmental impacts, and recent challenges. ScienceDirect. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0048969722007379>
50. 2035 the report electricity. 2035 Report. URL: <https://www.2035report.com/electricity/>