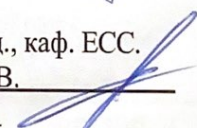


Вінницький національний технічний університет
Факультет електроенергетики та електромеханіки
Кафедра електричних станцій та систем

Бакалаврська кваліфікаційна робота на тему:
«ВРАХУВАННЯ НЕВИЗНАЧЕНОСТІ ПІД ЧАС
ІНТЕГРУВАННЯ ВІДНОВЛЮВАНИХ ДЖЕРЕЛ ЕНЕРГІЇ У
ЛОКАЛЬНІ ЕЛЕКТРИЧНІ СИСТЕМИ»

Виконав: студент 4 курсу, групи
ЕСМ-216
спеціальності 141 – «Електроенергетика,
електротехніка та електромеханіка»
за ОП «Електричні системи та
мережі», Маціпура С. М. 

Керівник: к.т.н., доц., каф. ЕСС.
Кулик В.В. 

« 06 » 06 2025 р.

Рецензент: к.т.н., доц., доцент кафедри
(наук.ступінь, вч.звання, назва кафедри)

ЕССЕМ Бакало О.О. ПР
« 06 » 06 2025 р.

Допущено до захисту
Завідувач кафедри ЕСС д.т.н.,
професор Комар В. О.


« 06 » 06 2025 р.

Вінниця ВНТУ – 2025 рік

Вінницький національний технічний університет
Факультет електроенергетики та електромеханіки
Кафедра електричних станцій та систем
Рівень вищої освіти перший (бакалаврський)
Галузь знань – 14 «Електрична інженерія»
Спеціальність – 141 – «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»
Освітньо-професійна програма – Електричні системи в мережі

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри ЕСС
д.т.н., професор Комар В. О.
«20» 03 2025 р.

ЗАВДАННЯ **НА БАКАЛАВРСЬКУ КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ СТУДЕНТУ**

Маціпура Сергій Миколайович
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи. «Врахування невизначеності під час інтегрування відновлюваних джерел енергії у локальні електричні системи»

Керівник роботи д.т.н., доц., проф каф. ЕСС Кулик В. В.
затверджена наказом вищого навчального закладу від 20.03.2025р № 97

2. Термін подання студентом роботи 03 червня 2025 року

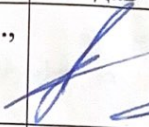
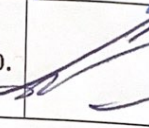
3. Вихідні дані до роботи: Перелік літературних джерел за тематикою роботи:

1. Правила улаштування електроустановок. – Видання офіційне. Міненерговугілля України. – Х. : Видавництво «Форт», 2017. – 760 с. 2. Лежнюк П. Д., Ковальчук О. А., Нікіторович О. В., Кулик В. В. Відновлювані джерела енергії в розподільних електричних мережах: монографія. Вінниця: ВНТУ, 2014. 204 с. 3. Кудря С. О., В. І. Будько В. І. Вступ до спеціальності. Нетрадиційні та відновлювані джерела енергії: Курс лекцій: НТУУ «КПІ», 2013. 387 с

4. Зміст текстової частини: Вступ. 1. Загальні відомості про об'єкт дослідження. 2. Визначення схеми та параметрів дослідної електричної мережі 3. Аналіз втрат в мережі при інтегруванні в неї СЕС. 4. Охорона праці. Висновки. Список використаних джерел. Додатки.

5. Перелік ілюстративного матеріалу (з точним зазначенням обов'язк
креслень) презентація

6. Консультанти розділів роботи

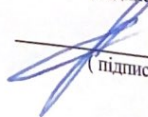
Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	виконано прийнято
Спеціальна частина	Керівник роботи Кулик В. В., д.т.н., доцент., професор кафедри ЕСС		
Охорона праці	Кобилянський О. В. д. пед. н., професор, зав. каф. БЖДПБ		

7. Дата видачі завдання 20 березня 2025 року

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва та зміст етапів	Термін виконання етапів роботи		Прізвище
		початок	кінець	
1	Формування та затвердження завдання БКР	17.03.25 р.	20.03.25 р.	
2	Вступ. Огляд літературних джерел	20.03.25 р.	28.03.25 р.	
3	Загальні відомості про об'єкт дослідження (розділ 1 БКР)	28.03.25 р.	11.04.25 р.	
4	Визначення схеми та параметрів дослідної електричної мережі (розділ 2 БКР)	11.04.25 р.	02.05.25 р.	
5	Аналіз втрат в мережі при інтегруванні в неї СЕС (розділ 3 БКР)	02.05.25 р.	16.05.25 р.	
6	Охорона праці (розділ 4 БКР)	16.05.25 р.	23.05.25 р.	
7	Формування висновків по роботі	23.05.25 р.	26.05.25 р.	
8	Оформлення пояснювальної записки	26.05.25 р.	30.05.25 р.	
9	Виконання рисунків та оформлення презентації	30.05.25 р.	03.06.25 р.	

Студент
Керівник роботи


(підпис)

(підпис)

Маціпура С. М.
Кулик В. В.

Анотація

УДК 621.311.1

Маціпура Сергій Миколайович «Врахування невизначеності під час інтегрування відновлюваних джерел енергії у локальні електричні системи». Бакалаврська кваліфікаційна робота. – Вінниця: ВНТУ. – 2025. – 90 с. Бібліогр.: 26. Рис.: 16. Табл.: 14.

У бакалаврській кваліфікаційній роботі я вираховував невизначеності під час інтегрування відновлюваних джерел енергії у локальні електричні системи.

У загальній частині роботи виконано загальний огляд локальних електричних систем, проведено аналіз інтеграції відновлюваних джерел енергії в ізолювані енергосистеми, проведене математичне формулювання інтегрованої енергетичної системи, що охоплює енергетичний, тепловий та водний сектори..

В розділі розрахунку досліджено попит та внесок відновлюваної енергетики, розраховано усі варіанти ризиків, які можуть застосовуватися при інтегрування відновлюваних джерел енергії у локальні електричні системи .

У розділі охорони праці опрацьовано такі питання, як склад повітря робочої зони, вимоги до освітлення приміщень виробничих підприємств, дія на організм людини та нормування шкідливих та небезпечних виробничих факторів у виробничому приміщенні, пожежна безпека.

Ключові слова: надійна оптимізація, гібридні енергетичні системи, інтеграція відновлюваних джерел енергії, автономна енергосистема, реагування на попит, комбіноване виробництво тепла та електроенергії, вітроенергетика, фотоелектрична енергетика.

Abstract

UDC 621.311.1

Matsipura Serhii Mykolaiovych “Accounting for uncertainty in the integration of renewable energy sources into local power systems”. Bachelor's thesis - Vinnytsia: VNTU. - 2025. - 90 p. Bibliography: 26. Fig. 16. Table: 14.

In my bachelor's thesis, I calculated the uncertainties in the integration of renewable energy sources into local power systems.

In the general part of the work, I provided a general overview of local power systems, analyzed the integration of renewable energy sources into isolated power systems, and mathematically formulated an integrated power system covering the power, heat, and water sectors.

In the calculation section, the demand and contribution of renewable energy are studied, and all risk options that can be applied when integrating renewable energy sources into local power systems are calculated.

The occupational health and safety section addresses such issues as the composition of the air in the working area, requirements for lighting of industrial premises, effects on the human body and the regulation of harmful and dangerous production factors in the production area, and fire safety.

Keywords: robust optimization, hybrid energy systems, integration of renewable energy sources, autonomous power system, demand response, combined heat and power, wind power, photovoltaic power.

Зміст

ВСТУП	4.
1 ЗАГАЛЬНІ ВІДОМОСТІ ПРО ЛОКАЛЬНІ ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИЧНІ СИСТЕМИ.....	7.
1.1 Постановка задачі.....	10.
1.2. Огляд літератури за тематикою дослідження.....	11.
1.3 Основні переваги застосування комбінованих моделей з урахуванням невизначеностей.....	13.
2 МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ	16.
2.1 Цільові функції	16.
2.2 Обмеження	22.
2.3 Моделювання невизначеності	35.
2.4 Ставлення до ризику в робастній оптимізації	38.
3 ВХІДНІ ДАНІ ТА ВИХІДНІ РЕЗУЛЬТАТИ.....	42.
3.1 Попит та вкладення у відновлювану енергетику	42.
3.2 Потужності системи та операційні витрати.....	44.
3.3 Невизначеність та вхідні дані для різних сценаріїв ризику.....	47.
3.4 Результати та підсумки, що виключають ризик.....	48.
4 ОХОРОНА ПРАЦІ	67.
ВИСНОВКИ.....	79.
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	81.
ДОДАТОК А (обов'язковий). Протокол перевірки навчальної (кваліфікаційної) роботи	84.
ДОДАТОК Б (обов'язковий). Ілюстративна частина.....	85.

Вступ

Мета і задачі дослідження. Метою роботи є дослідження гібридних енергетичних систем для локальних потреб, що враховують невизначеність ВДЕ та попиту, інтегрують різні джерела енергії, системи накопичення та управління навантаженнями, є актуальним науковим та практичним завданням.

Відповідно до вказаної мети в роботі розв'язуються такі **основні задачі**:

- огляд літератури за тематикою дослідження;
- постановка задачі оптимізації структури енергозабезпечення локальної енергосистеми;
- врахування невизначеності параметрів під час вирішення задачі оптимізації.

Забезпечення надійного та безперебійного енергопостачання є критично важливим для функціонування сучасних суспільств, промислових підприємств, комерційних об'єктів та об'єктів життєзабезпечення. В умовах сучасних викликів, зокрема в Україні, централізована електроенергетична система може не завжди гарантувати стабільне та безперебійне постачання електроенергії, що може призвести до значних економічних втрат, збоїв у виробництві та погіршення якості життя. Це підкреслює зростаючу потребу в розробці та впровадженні децентралізованих, автономних енергетичних рішень, які забезпечують енергетичну стійкість та незалежність на локальному рівні.

Традиційно, для забезпечення автономності енергопостачання, особливо в віддалених або критично важливих об'єктах, широко використовувалися дизельні генератори та інші традиційні джерела енергії. Хоча ці джерела можуть забезпечити певну надійність, вони пов'язані з високими експлуатаційними витратами, значним негативним впливом на довкілля через викиди парникових газів та забруднюючих речовин, а також логістичними викликами, пов'язаними з доставкою палива.

У відповідь на зростаючий тиск щодо впровадження сталих енергетичних практик та глобальне прагнення до скорочення викидів вуглецю, існує нагальна потреба у розробці та впровадженні більш екологічно чистих та економічно ефективних енергетичних рішень для локальних систем. Це призводить до активного дослідження та впровадження гібридних енергетичних систем, які інтегрують традиційні генератори з відновлюваними джерелами енергії. Зростаюче проникнення відновлюваних джерел енергії (ВДЕ), таких як вітрові турбіни та сонячні фотоелектричні установки, є багатообіцяючою альтернативою, пропонуючи потенціал для скорочення викидів парникових газів, зниження експлуатаційних витрат та підвищення загальної стійкості енергетичної системи.

Проте, інтеграція ВДЕ в локальні енергосистеми вносить нові складнощі, насамперед через притаманну відновлюваним джерелам енергії переривчастість і невизначеність генерації енергії (наприклад, залежність від погодних умов). Це створює виклики для підтримання стабільного балансу між виробництвом та споживанням енергії. Можливість інтеграції систем накопичення енергії, таких як акумуляторні батареї, вирішує ці проблеми, дозволяючи надлишкову відновлювану енергію, вироблену в періоди низького попиту або високої генерації, зберігатися і використовуватися, коли відновлюваних ресурсів недостатньо або попит зростає. Крім того, програми реагування на попит (РП) стають важливим інструментом для ефективного управління розміщенням ресурсів у локальних енергосистемах. Ці програми дозволяють операторам систем і автоматизованим системам енергоменеджменту гнучко керувати певними навантаженнями (наприклад, опаленням, охолодженням, освітленням, водопідготовкою), переносючи їх споживання на час більшої доступності відновлюваної енергії або менших тарифів.

Окрім електроенергії, значна частина локальних споживачів, таких як житлові комплекси, лікарні, дата-центри чи невеликі промислові об'єкти, також мають значну потребу в тепловій енергії та воді. Це робить постачання цих

ресурсів критично важливим для їх безперервного функціонування. Локальні енергетичні системи можуть досягти більшої ефективності та економічної вигоди шляхом включення тепло- та водопостачання до інтегрованої гібридної енергетичної системи. Наприклад, когенераційні установки (ТЕЦ) можуть виробляти електроенергію, одночасно уловлюючи тепло для опалення приміщень, гарячого водопостачання або інших промислових процесів. Це дозволяє оптимізувати використання первинного палива та зменшити загальні експлуатаційні витрати, підвищуючи енергоефективність та стійкість локальної системи.

Таким чином, розробка та оптимізація гібридних енергетичних систем для локальних потреб, що враховують невизначеність ВДЕ та попиту, інтегрують різні джерела енергії, системи накопичення та управління навантаженнями, є актуальним науковим та практичним завданням.

1. Загальні відомості про локальні електроенергетичні системи

У сучасному світі, що динамічно розвивається, забезпечення надійного, ефективного та сталого енергопостачання є однією з найважливіших передумов для функціонування економіки, розвитку суспільства та підвищення якості життя. Традиційно, електроенергетичні системи були централізованими, з великими електростанціями, що виробляють електроенергію та передають її на великі відстані через розгалужені магістральні мережі до кінцевих споживачів. Однак, зростаючі виклики, такі як нестабільність централізованих мереж (особливо в умовах зовнішніх загроз або застарілої інфраструктури), підвищення попиту на енергію, необхідність скорочення викидів парникових газів та прагнення до енергетичної незалежності, зумовили активний розвиток концепції локальних електроенергетичних систем (також відомих як мікромережі, автономні енергосистеми або децентралізовані енергосистеми).

Локальна електроенергетична система (ЛЕЕС) – це самостійний або напівсамостійний комплекс з виробництва, розподілу та споживання електричної (а часто і теплової/холодової) енергії, який обслуговує обмежену географічну територію або групу споживачів. Це може бути окремий промисловий об'єкт, житловий квартал, кампус університету, військова база, віддалене поселення або навіть окрема будівля. Ключовою особливістю ЛЕЕС є їхня здатність працювати як автономно (в "острівному" режимі, відключеному від централізованої мережі), так і в інтегрованому режимі з національною або регіональною електромережею, забезпечуючи двосторонній обмін енергією.

Сучасна локальна електроенергетична система (ЛЕЕС) включає різноманітні компоненти, які спільно працюють для забезпечення енергетичних потреб. До них відносяться джерела генерації, що є серцем більшості таких систем. Серед них виділяються відновлювані джерела енергії (ВДЕ), такі як фотоелектричні (ФЕ) панелі, що перетворюють сонячне випромінювання на

електроенергію і ідеально підходять для денного виробництва; вітрові турбіни, що використовують енергію вітру, особливо ефективні у вітряних регіонах; біоенергетичні установки, які виробляють енергію з біомаси (наприклад, біогазові установки), забезпечуючи більш стабільну базову генерацію; а також малі гідроелектростанції, що застосовуються у регіонах з водними ресурсами. Поряд з ВДЕ, ЛЕЕС часто використовують традиційні джерела генерації для забезпечення базового навантаження або резерву, а також для компенсації переривчастості ВДЕ. Це дизель-генератори, які є надійними, але дорогими в експлуатації та мають високий вуглецевий слід, та газопоршневі установки або когенераційні установки (КГУ), що виробляють одночасно електроенергію та тепло, значно підвищуючи загальну ефективність використання палива та дозволяючи забезпечувати комплексні потреби споживачів.

Важливим елементом ЛЕЕС є системи накопичення енергії (СНЕ), які вирішують проблему переривчастості ВДЕ. Найпоширенішим типом СНЕ є акумуляторні батареї (літій-іонні, свинцево-кислотні тощо), які дозволяють зберігати надлишкову енергію, вироблену ВДЕ, і віддавати її в періоди високого попиту або низької генерації. Також можуть застосовуватися термальні акумулятори для зберігання теплової енергії, а маховики та суперконденсатори використовуються для швидкої підтримки стабільності системи.

Системи управління енергією (СУЕ) та інтелектуальні контролери є "мозком" ЛЕЕС. Вони включають функції прогнозування (моделі для передбачення генерації ВДЕ на основі погодних даних та попиту на енергію), оптимізації (алгоритми для оптимального планування роботи всіх компонентів, мінімізації витрат, максимізації використання ВДЕ та забезпечення надійності), моніторингу та контролю (системи збору даних та дистанційного управління компонентами). Особливе місце займає управління попитом (Demand Response - DR) – програми, які заохочують або автоматично керують споживанням

енергії, переносячи або зменшуючи навантаження у відповідь на сигнали про стан системи або ціни на енергію.

Переваги локальних електроенергетичних систем є багатогранними. Вони забезпечують підвищення надійності та стійкості завдяки здатності працювати автономно у разі збоїв у централізованій мережі (блекаутів), гарантуючи безперервне енергопостачання для критично важливих об'єктів. Це також сприяє енергетичній незалежності та безпеці, зменшуючи залежність від великих централізованих постачальників та імпортованих ресурсів, що підвищує енергетичний суверенітет регіону або об'єкта. Оптимізоване використання ВДЕ та інтеграція когенерації дозволяють досягти зниження експлуатаційних витрат у довгостроковій перспективі. З екологічної точки зору, ЛЕЕС сприяють екологічній стійкості шляхом зменшення викидів парникових газів та інших забруднювачів за рахунок використання ВДЕ. Генерація енергії ближче до споживача призводить до зниження втрат у мережах при передачі та розподілі. Крім того, ЛЕЕС характеризуються гнучкістю та масштабованістю, оскільки можуть бути розроблені та адаптовані до конкретних потреб, а їхня потужність може бути збільшена або зменшена за потреби. В інтегрованому режимі ЛЕЕС також можуть надавати допоміжні послуги централізованій мережі, такі як підтримка балансу мережі через регулювання частоти та напруги.

Незважаючи на значні переваги, інтеграція ВДЕ в ЛЕЕС несе із собою ряд викликів, пов'язаних головним чином з їхньою невизначеністю. Це включає невизначеність генерації ВДЕ, обумовлену залежністю від погодних умов (сонце, вітер), що призводить до непередбачуваних коливань виробництва енергії. Також існує невизначеність навантаження, оскільки попит на електроенергію змінюється залежно від часу доби, сезону, дня тижня та непередбачуваних подій. Це ускладнює управління системою, оскільки вимагає ефективного узгодження роботи різномірних джерел, систем зберігання та

гнучких навантажень у реальному часі. Розвиток локальних електроенергетичних систем є одним з ключових напрямків трансформації світової енергетики. Завдяки подальшому вдосконаленню технологій ВДЕ, систем накопичення енергії, а також розвитку інтелектуальних систем управління, ЛЕЕС ставатимуть все більш поширеними та ефективними. Вони відіграватимуть вирішальну роль у забезпеченні енергетичної безпеки та побудові більш стійкого та розподіленого енергетичного майбутнього. В Україні, враховуючи виклики для централізованої енергосистеми, розвиток ЛЕЕС є особливо актуальним для підвищення енергетичної стійкості міст, громад та критичної інфраструктури.



Рисунок 1. Інтегрована ізольована гібридна система виробництва електроенергії, тепла та води.

1.1. Постановка задачі

Виклики, пов'язані з інтеграцією відновлюваних джерел енергії в автономні енергетичні системи є багатогранними і потребують комплексних рішень. Мінливість вітру, швидкості сонячного випромінювання в поєднанні з мінливою та іноді непередбачуваною енергією вимагає розробки надійних

стратегій енергоменеджменту, щоб енергосистеми залишалися надійними, ефективними та сталими. Ці виклики є паралельними, особливо яскраво виражена в ізольованих або автономних енергосистемах, де відсутність мережевого підключення вимагає високостійкого підходу до управління енергоспоживанням, здатного адаптуватися дозволяючи на притаманну відновлюваним джерелам нестабільність та обмежену доступність варіантів резервного живлення. У таких умовах нездатність задовольнити попит може призвести до значних перебоїв у роботі, особливо в таких критично важливих секторах, які постраждали від війни, де безперебійне та надійне енергопостачання є вкрай важливим. Тому стратегічний підхід, який інтегрує різноманітні джерела енергії, включає в себе різні програми та враховує невизначеності в генерації та попиті, які мають вирішальне значення для підтримання стабільності системи та оптимізації загальної продуктивності.

1.2. Огляд літератури за тематикою дослідження

Інтеграція відновлюваних джерел енергії в ізольовані енергосистеми набула значного розмаху, останніми роками приділяється значна увага, особливо в таких галузях, де надійність та стійкість є критично важливими. Унікальні виклики, пов'язані з мінливістю та взаємозалежністю відновлюваних джерел енергії, а також віддаленість місць розміщення, призвели до появи різних інноваційних рішень. У дослідженні застосовано алгоритми кластеризації K-Means та K-Medoids для оптимізації розташування гібридних систем відновлюваної енергетики в сільській місцевості України. Засоби виявилися більш надійними для вибору місця розташування, незважаючи на те, що K-Medoids генерують вищі середні показники сонячної та вітрової енергії. У дослідженні систематичний та інтегративний підхід, запропоновано оптимальний економічний розмір гібридної мікромережі для позамережевих локальних систем. Запропоноване дослідження фокусується на оцінці прибутковості гібридних систем відновлюваної енергетики в нашій країні.

В Україні визначено основні місця видобутку корисних копалин, враховуючи технічні та екологічні чинники, та економічні міркування. У роботі досліджується потенціал гібридної регенерації, нові енергетичні системи, що поєднують плаваючі фотоелектричні (ФЕ), вітрові турбіни (ВТ). Робота, яку виконали, розглядає енергетичні рішення для автономних локальних систем в Україні які постраждали від війни, використовуючи HOMERPro та АНР для вибору оптимальних гібридних систем, що включають вітрові, сонячні та акумуляторні батареї. Завдяки моделюванню за методом Монте-Карло та оптимізації з урахуванням ризиків, дослідження показує, що відновлювана енергетика може забезпечити надійне електропостачання з низькими експлуатаційними витратами, що робить її придатною для віддалених локальних об'єктів. У дослідженні використовується оптимізована комбінація фотоелектричних панелей, вітрогенераторів, дизель-генераторів, акумуляторних систем зберігання енергії (BESS), і систем паливних елементів, оптимізована за допомогою генетичного алгоритму. Цей комплексний підхід підкреслює потенціал інтеграції відновлюваної енергетики в ізольованому середовищі. Аналогічно, в представлену систему з декількома поколіннями, призначену для виробництва електроенергії, опалення, охолодження прісної води та метану. Ця система ретельно оцінюється за допомогою, економічного та екологічного аналізів, що демонструє її життєздатність для багатогенераційного виробництва енергії.

В іншому дослідженні представлено багатоцільову оптимізацію для проектування систем водопостачання в населені пункти України, де електропостачання є порушене, зосереджену на скороченні операційних витрат і викидів парникових газів. У ньому висвітлюються економічні та екологічні переваги використання інтегрованих систем водопостачання, зокрема, завдяки включенню сонячних фотоелектричних установок. Автори представляють систему мікромереж, яка інтегрує відновлювані джерела енергії з технологією Power-to-Gas, що підтримується дизельним генератором та акумуляторною

батареєю. Усього за рік було побудовано та оптимізована для виробництва, зберігання та споживання водню, демонструючи потенційний шлях для енергетичних рішень на основі водню в мікромережах. Більше представляє стратегію низьковуглецевої оптимізації для мультиенергетичної інтегрованої енергетики, пов'язаної з різними видами енергії, що включає в себе накопичувач водневої енергії та двоступеневу комбіновану систему «енергія-газ» (CHP). Новий гібридний процес охолодження та виробництва електроенергії що використовує природний газ та біомасу. Система оптимізована за допомогою трицільової оптимізації та оцінена з термодинамічної, екологічної та економічної точок зору, що демонструє потенціал гібридних відновлюваних систем для різноманітних енергетичних застосувань. Енергетики досліджують координацію гнучких ресурсів між різними енергоносіями в ринкових умовах. Їх робота об'єднує системи газо-, тепло- та електропостачання для оптимізації стратегій планування для різних потреб в енергії, підкреслюючи важливість скоординованого управління енергією в інтегрованих системах.

1.3. Основні переваги застосування комбінованих моделей з урахуванням невизначеності

Хоча розглянуті мною статті надають цінну інформацію щодо оптимізації та інтегрування розвитку гібридних енергетичних систем, залишається прогалина в дослідженнях, пов'язаних з розробкою всебічних багатоджерельних моделей, які значно підвищують надійність і відмовостійкість у віддалених та ізольованих областях енергосистеми. У цій роботі представлено новий підхід до планування багатонасінної енергії в ізольованих районах, інтегруючи широкий спектр відновлюваних і традиційних джерел енергії.

Дослідження інноваційно оптимізує багатоджерельну гібридну енергетичну систему, щоб задовольнити різноманітні потреби в електроенергії, теплі та питній воді в таких умовах. Профілактичні заходи, спрямовані на запропоновану модель забезпечують надійність та стійкість системи в умовах

невизначеності завдяки використанню передових методів змішаного цілочисельного лінійного програмування (MILP) та надійних технологій оптимізації.

- Запропонована модель інтегрує як традиційні, так і відновлювані джерела енергії, забезпечення операційної ефективності, продуктивності та сталого розвитку в Україні.

- Система оптимізує планування енергетичних та водних ресурсів, враховуючи технічні та експлуатаційні обмеження, характерні для ізольованих енергосистем.

- У файлі наголошується на необхідності проведення стійких операцій з урахуванням невизначеності у виробництві відновлюваної енергії, коливання попиту та наявності вільних ресурсів.

- Модель пропонує стратегії, які забезпечують баланс між економічною ефективністю та надійністю в управлінні енергією та водопостачанням.

- Надійний метод оптимізації використовується для обробки невизначеностей, пов'язаних з відновлюваними джерелами енергії та коливанням попиту, забезпечуючи надійну роботу незалежно від різних сценаріїв ризику (не схильних до ризику, нейтральних до ризику та схильних до ризику).

Ця робота складається з чотирьох розділів. Розділ 1 являє собою загальні відомості про локальні електроенергетичні системи, їхній вклад у загальну електроенергетичну систему. У розділі 2 представлено комплексне математичне формулювання для багатоджерельної гібридної енергетичної системи з акцентом на мінімізацію експлуатаційних витрат як цільової функції з обмеженнями, які є експлуатаційними обмеженнями відновлюваних і традиційних джерел енергії та систем зберігання. Запропоновано метод

надійної оптимізації, що включає математичне моделювання сценаріїв з уникненням ризику, нейтральним ставленням до ризику та прагненням до ризику для усунення невизначеностей у виробництві та споживанні відновлюваної енергії. У розділі 3 наведено вхідні дані та припущення, використані в дослідженні, а також надано детальний аналіз результатів, включаючи витрати, надійність та продуктивність системи. Розділ 4 з охорони праці присвячений дослідженню умов праці електротехнічного персоналу, що виконує моделювання стану локальних електричних мереж під час інтегрування відновлювальних джерел енергії.

2. Математичне моделювання

У цьому розділі представлено математичне формулювання інтегрованої енергетичної системи, що охоплює енергетичний, тепловий та водний сектори. Модель була розроблена для відображення унікальних вимог до оптимізації використання різних енергоресурсів для задоволення потреб при мінімізації загальних операційних витрат. Енергоресурси включають дизельний генератор (ДГ), ТЕЦ, ВТ, ФЕС, BESS, бойлери. Крім того, система враховує споживачів чистої енергії, таких як опріснювальні установки, видобуток підземних вод, рециркуляція води та зберігання води.

2.1 Цільові функції

Цільова функція спрямована на мінімізацію загальних витрат на експлуатацію енергосистеми, яка включає кілька компонентів: витрати на паливо, витрати на запуск, витрати на штрафні санкції за незадоволений попит (енергія, що не обслуговується), витрати на циклічне використання акумуляторів та теплоакumuлюючих установок, та витрати на енергоспоживання для процесів, пов'язаних з водою, таких як опріснення та очищення води. Кожна складова витрат розраховується на основі різних операцій системи та об'єднується у загальну функцію витрат. Цільова функція цього дослідження позначається рівнянням (1):

$$\min_{t \in T} \sum (\text{Витрати на паливо} + \text{Витрати на запуск} + \text{Витрати на управління попитом} + \text{Витрати на штрафні санкції} + \text{Витрати на водопостачання} + \text{Витрати на акумуляторні батареї та теплоаккумулятори}) \quad (1)$$

Цільова функція, як визначено в рівнянні (1), спрямована на мінімізацію загальних операційних витрат енергетичної системи за горизонті планування. Оскільки всі витрати вимірюються в грошових одиницях, їх можна

безпосередньо підсумовувати без застосування вагових коефіцієнтів. У цьому контексті процес оптимізації мінімізує ці загальні витрати з урахуванням експлуатаційних навантажень системи, балансує компроміси між різними компонентами витрат. Високі штрафні витрати на незадоволений попит гарантують, що надійність є пріоритетом, в той час як витрати на аварійні відключення та операційні обмеження не дозволяють надмірно покладатися на якусь одну операційну стратегію. Об'єднавши компоненти витрат в єдину цільову функцію, ми перетворюємо задачу в одноцільову оптимізацію, яка вирішується за допомогою MILP. Такий підхід гарантує, що оптимізація шукає найбільш економічно ефективне рішення, яке відповідає всім вимогам і дотримується операційних лімітів, не допускаючи, щоб жоден компонент витрат не став досить високим.

2.1.1. Витрати на паливо (ГР, ТЕЦ, котельня)

Витрати на паливо пов'язані з енергією, ТЕС, ТЕЦ та котлів. Витрата палива розраховується шляхом ділення потужності або теплової потужності на ККД відповідного генератора. Формула для вартості палива виглядає наступним чином

$$\text{Рівняння (2):} \quad \text{Вартість палива} = \sum_{t \in T} \left(C_{\text{паливо, ДГ}} \cdot \frac{P_{\text{ДГ},t}}{\eta_{\text{ДГ}} \cdot \text{LHV}_{\text{ДГ}}} + C_{\text{паливо, ТЕЦ}} \cdot \frac{P_{\text{СНР},t} + H_{\text{СНР}}}{\eta_{\text{СНР}} \cdot \text{LHV}_{\text{СНР}}} + C_{\text{паливо, ТЕЦ}} \cdot \frac{H_{\text{котел}}}{\eta_{\text{котел}} \cdot \text{LHV}_{\text{ДГ}}} \right) \quad (2)$$

Де $C_{\text{fuel,DG}}$, $C_{\text{fuel, СНР}}$ та $C_{\text{fuel,(Boiler)}}$ витрати палива на одиницю для DG, СНР та LHV(DG), LHV(СНР) та LHVBoiler представляють нижчі значення теплоти згоряння для кожного виду палива. $P_{\text{ГТ},t}$ та $P_{\text{ТЕЦ},t}$ позначають вихідну потужність блоків ГТ та ТЕЦ на рівні часу t , тоді як $H_{\text{котел},t}$ та $H_{\text{ТЕЦ},t}$ представляють теплову потужність котла та ТЕЦ відповідно. Терміни ефективності η_{DG} , η^{elec} та $\eta(\text{Boiler})$ відповідають ефективності ГД, ТЕЦ та котельні.

2.1.2. Стартові витрати

Витрати на запуск виникають кожного разу, коли запускається ГД. Ці витрати позначаються як:

Рівняння (3):

$$\text{Стартова вартість} = \sum_{t \in T} C^{\text{старт}} \cdot v_{DG,t} \quad (3)$$

де $C^{\text{(start)}}$ - стартова вартість ДР, $v_{DG,t}$ – бінарна змінна, яка дорівнює 1, якщо ДГ запускається в момент часу t .

2.1.3. Реагування на попит

Програми дозволяють системі зменшити попит у різних секторах за певну ціну. Витрати, пов'язані з реагуванням на попит, відображають витрати, понесені при зміні системи або скорочення попиту, щоб зберегти операційну стабільність та уникнути дорогої залежності від резервного копіювання джерел генерації, такі як дизельні генератори. Реагування на попит ізольованих локальних електроенергетичних систем, зосереджується на регулюванні не критичних і гнучких навантажень, не впливаючи на основні виробничі процеси.

Ключові сфери для впровадження реагування на попит включають наступні:

- Гнучкі системи опалення, вентиляції та кондиціонування повітря (ОВіК) в адміністративних будівлях та житлових приміщеннях для робітників, які можуть витримати незначні коригування під час роботи без шкоди для безпеки та комфорту працівників.
- Терміни проведення робіт з технічного обслуговування та експлуатації некритичного обладнання донепікового часу або періоду з достатньою кількістю відновлюваної генерації, що зменшує навантаження на первинних енергетичних ресурсах.
- Коригування на певних етапах переробки руди, де при незначній

гнучкості можлива синхронізація, що дозволяє змінювати навантаження без шкоди для продуктивності.

Щоб мінімізувати вплив на основні процеси, заходи обмежуються на 15% від загального попиту на електроенергію, тепло чи воду, гарантуючи, що критичні навантаження залишаються незмінними. У нашій моделі представлено змінні, які спеціально регулюють ці некритичні навантаження, з обмеженнями, що захищають основні операції. Стратегії координуються за допомогою автоматизованих систем енергоменеджменту, які реагують на внутрішні сигнали, оптимізуючи використання енергії на основі доступності відновлюваних ресурсів та поточного рівня попиту. Формула для розрахунку витрат реагування на попит наведена у рівнянні (4)

$$DR_{\text{вартість}} = \sum_{t \in T} (C_{\text{ел.енергія}} \cdot DR_{\text{ел.енергія}} + C_{\text{тепло}} \cdot DR_{\text{тепло}} + C_{\text{вода}} \cdot DR_{\text{вода}}) \quad (4)$$

де DR^{elec} , DR^{heat} та DR^{water} - скорочення попиту на електроенергію, теплового та водного секторів, відповідно, в момент часу t . Крім того, C^{elec} , C^{heat} та $C^{(\text{water})}$ відображає DR, t витрати, пов'язані з операційними змінами, підтримкою стабільності системи та забезпеченням безперервної продуктивності без надмірної залежності від дизельних генераторів.

2.1.4. Штрафні санкції

Штрафні витрати виникають, коли система не може задовольнити попит, що призводить до недовиробництва енергії в секторах електроенергії, тепла та води. Штрафні витрати розраховуються за допомогою рівняння (5).

$$\text{Вартість штрафу} = \sum_{t \in T} (C_{\text{ел.енергія}} \cdot \text{ENS}^{(\text{ел.енергія})} + C_{\text{тепло}} \cdot \text{ENS}^{\text{тепло}} + C_{\text{вода}} \cdot \text{ENS}^{\text{вода}}) \quad (5)$$

де ENS^{elec} , ENS^{heat} та $\text{ENS}^{\text{water}}$ представляють невикористану енергію в електроенергії, тепло- та водопостачання в момент часу t . Крім того, C^{elec} , C^{heat} та C^{water} - це величини втрат електроенергії та води в секторах навантаження (штрафні санкції) для секторів електроенергетики, тепло- та водопостачання.

На відміну від великих взаємопов'язаних мереж, якими керують оператори ринку, де постачальники енергії, регулятор ринку та споживачі є трьома різними та відокремленими організаціями, ізольований характер майнінгу система запроваджує іншу операційну парадигму. У таких системах гірничовидобування виступає як постачальник і споживач енергії. Таким чином, наслідки непостачання енергії безпосередньо пов'язані з операційною діяльністю та продуктивністю. Цей унікальний механізм передбачає, що штрафні санкції за незадоволений попит відображають середню вартість незадоволеного попиту на основі операційних впливів, включаючи потенційні втрати в повітряних лініях, ризики для безпеки людей і обладнання. З огляду на цю структуру, ми прийняли значення $C_{(\text{VOLL})}$ як практичний і зручний підхід до представлення економічного впливу збоїв у постачанні.

2.1.5. Енергоспоживання для опріснення та очищення води

Процеси опріснення та очищення води потребують електроенергії, а вартість електричного споживання розрахована на основі споживання електроенергії на ці процеси. Витрати електроенергії на опріснення та очищення води визначаються рівняннями (6) і (7).

$$\begin{aligned} &\text{Вартість електроенергії для опріснення} \\ &= C_{\text{elec}} \cdot \sum_{t \in T} P_{\text{Desal}, t} \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} & \text{Вартість електроенергії для} \\ & \text{водопідготовки} = C_{\text{elec}} \cdot \sum_{t \in T} P_{\text{водопідготовка}, t} \end{aligned} \quad (7)$$

Де $P_{\text{Desal}, t} = E_{\text{Desal}, t} \cdot W_{\text{Desal}, t}$ - витрати електроенергії на опріснення води в момент часу t , а $E_{\text{Desal}, t}$ - потреба в енергії на одиницю опрісненої води, а $W_{\text{Desal}, t}$ - кількість опрісненої води в момент часу t . Крім того, $P_{\text{обробка}, t} = E_{\text{обробка}, t} \cdot (W_{\text{GW}, t} + W_{\text{переробка}, t})$ витрати електроенергії на очищення води в момент часу t , де $E_{\text{Очищення}, t}$ – енергія потреби на одиницю очищеної води, $W_{\text{GW}, t}$ – це очищені підземні води, а $W_{\text{Recycle}, t}$ – це оборотні води, оброблені в момент часу, t . C_{elec} - це вартість електроенергії за кВт-год. Ці витрати враховують споживання електроенергії, пов'язане як з опрісненням, так і з процесами водопідготовки, які є важливими для забезпечення прісною водою ізолюваних систем або районів з обмеженим доступом до природних водних ресурсів.

2.1.6. Витрати на акумулятори та накопичувачі тепла

Витрати, пов'язані з циклом роботи акумуляторної батареї та систем теплового накопичення, розраховуються на основі загального енергоспоживання (суми енергії заряджання та розряджання) протягом планового періоду, що виражається наступними рівняннями:

$$\text{Вартість батареї} = C_{\text{цикл. BESS}} \cdot \sum_{t \in T} (P^{\text{ch}}_{\text{BESS}, t} + P^{\text{dis}}_{\text{BESS}, t}) \quad (8)$$

$$\text{Вартість зберігання тепла} = C_{\text{цикл. BESS}} \cdot \sum_{t \in T} (H^{\text{ch}}_{\text{BESS}, t} + H^{\text{dis}}_{\text{BESS}, t}) \quad (9)$$

Де P^{ch} та P^{dis} потужність заряду та розряду акумулятора, відповідно. H^{ch} та H^{dis} – це швидкість заряджання та розряджання відповідно. $C_{\text{цикл}}$ та $C_{\text{цикл}}$

представляють витрати на одиницю енергетичної потужності для зберігання тепла, відповідно. Ці формули відображають операційні витрати, пов'язані з загальною пропускнуою здатністю, що відображає сукупний знос та деградацію системи зберігання. Зосереджуючись на обробленій енергії, а не на кількості повних циклів, цей підхід забезпечує практичний та обчислювально-ефективний метод управління витратами на циклічність, що відповідає галузевій практиці операційного планування візольованих гібридних енергетичних системах. Крім того, цей метод враховує 24-годинний короткостроковий період планування, протягом якого батарея зазвичай проходить обмежений процес заряджання та розряджання. Враховуючи таку коротку тривалість, вплив деградації батареї є мінімальним. Якщо припустити, що річний темп деградації становить приблизно 2,33-3,80%, то деградація за один 24-годинний день становить близько 0,006%. Таким чином, використання загальної пропускнуої здатності як проксі, для оцінки витрат на циклічневикористання забезпечує розумне наближення для цілей операційного планування.

2.2. Обмеження

Обмеження в моделі цієї статті розроблені таким чином, щоб забезпечити надійну роботу багато джерельних гібридних енергетичних систем, дотримуючись при цьому технічних та експлуатаційних обмежень. Ці обмеження включають баланс попиту на електроенергію, тепло та воду з доступного постачання, як з відновлюваних, так і з традиційних джерел енергії, таких як дизельне паливо, генератори, когенераційні установки та відновлювані джерела енергії, такі як вітер та сонце. Додатковими перевагами є те, що дефіцит електроенергії призводить до обмеження потужності систем зберігання енергії, таких як акумуляторні батареї та теплові насоси, а також експлуатаційні обмеження на опріснювальних установках та системах повторного використання води. Крім того, для регулювання попиту в періоди пікового

навантаження застосовуються заходи, що підвищують гнучкість системи. Ці обмеження в сукупності забезпечують ефективну роботу гібридної енергетичної системи, задовольняючи потреби в енергії та воді за різних сценаріїв невизначеності.

2.2.1. Обмеження енергетичного, теплового та водного балансу

Обмеження балансу потужності гарантує, що в кожен момент часу t сумарна потужність, що генерується, включаючи енергію, що розряджається зі сховища, дорівнює попиту плюс енергії споживання системами зберігання та обробки води (опріснення та очищення). У бакалаврській роботі розглядається питання про те, що наступне рівняння (10) представляє обмеження, що забезпечує баланс між попитом і пропозицією в системі:

$$P_{DG,t} + P_{CHP,t} + P_{WT,t} + P_{PV,t} + P_{disS,t} + P_{EN} = P_{elec} + P_{DRelec}, \quad (10)$$

де $P_{WT,t}$ та $P_{PV,t}$ - вихідна потужність вітрової турбіни, а фотоелектричної системи. $P_{dem,t}$ - попит на електроенергію в момент часу t .

Рівняння (11) формулює обмеження теплового балансу, яке гарантує, що сумарна кількість теплоти, що підводиться = попиту на теплову енергію, включаючи заряджання/розряджання накопичувачів, ВТВ та будь-який незадоволений попит на теплову енергію.

$$H_{Boiler,t} + H_{CHP,t} + H_{dis} + H_{EN} = H_{DRelec,t} + H_{ch}, \quad \forall t \in T \quad (11)$$

Обмеження водного балансу, виражене в рівнянні (12), забезпечує, що загальний обсяг водопостачання задовольняє попит у кожен момент часу t , враховуючи заряджання/розряджання резервуарів та будь-який незадоволений

ПОПИТ НА ВОДУ:

$$W_{\text{Опріснення}} + W_{\text{GW}, t} + W_{\text{Переробка}, t} + W_{\text{зовні}} + \text{ENS}_{\text{вода}} + \text{DR}_{\text{вода}} = W_{\text{dem}, t} + W^{\text{in}}, \quad \forall t \in T \quad (12)$$

2.2.2. Обмеження BESS

Стан заряду батареї оновлюється на кожному часовому кроці. SOC (state of charge) стан заряду залежить від кількості зарядженої та розрядженої енергії, скоригованої на відповідні коефіцієнти корисної дії. Рівняння (13) визначає процес оновлення SOC.

$$\text{SOC}_{\text{BESS}, t} = \text{SOC}_{\text{BESS}, t-1} + \eta^{\text{ch}} \cdot P_{\text{BESS}} - \eta^{\text{dis}}_{\text{BESS}, t}, \quad t \geq 1 \quad (13)$$

Де η^{ch} та η^{dis} ефективність заряджання та розряджання відповідно. SOC завжди повинен залишатися в межах ємності акумулятора, щоб запобігти перезарядженню або виснаженню згідно з рівнянням (14):

$$0 \leq \text{SOC}_{\text{BESS}, t} \leq E^{\text{max}}_{\text{BESS}}, \quad \forall t \in T \quad (14)$$

Де E^{max} максимальна енергетична ємність акумулятора. Потужність заряджання та розряджання обмежується заздалегіть визначеними експлуатаційними межами, що забезпечують безпечну експлуатацію акумулятора, як це сформульовано в рівнянні (15):

$$0 \leq P^{\text{ch}}_{\text{BESS}, t} \leq P^{\text{ch}, \text{max}}_{\text{BESS}}, \quad 0 \leq P^{\text{dis}}_{\text{BESS}, t} \leq P^{\text{dis}, \text{max}}_{\text{BESS}}, \quad \forall t \in T \quad (15)$$

Щоб уникнути експлуатаційних конфліктів, акумулятор не може заряджатися і розряджатися одночасно. Це обмеження накладається рівнянням

$$P_{\text{BESS},t}^{\text{ch}} \cdot P_{\text{BESS},t}^{\text{dis}} = 0, \quad \forall t \in T \quad (16)$$

2.2.3. Обмеження вихідної потужності вітроенергетики

Потужність вітрогенератора залежить від швидкості вітру і регулюється наступними умовами:

$$P_{\text{WT},t}^{\text{WT}} = \begin{cases} 0, & V_t < V_{ci} \\ P_{\text{max}} * \frac{V_t - V_{ci}}{V_r - V_{ci}}, & V_{ci} \leq V_t \leq V_r \\ P_{\text{max}}, & V_r \leq V_t \leq V_{co} \\ 0, & V_t > V_{co} \end{cases} \quad (17)$$

Де V_t - швидкість вітру в момент часу t . $V_{ci,r}$ та V_{co} - коефіцієнти вмикання, та вимикання швидкості вітру відповідно. P_{max} - максимальна потужність вітрової турбіни.

2.2.4. Обмеження на вихід сонячної енергії

Потужність, що генерується фотоелектричною системою, залежить від сонячного випромінювання, панелей та площі фотоелектричних панелей. У даній моделі ми використовуємо глобальну похилу інтенсивність сонячного випромінювання (Global Tilted Irradiance, GTI) як міру сонячного випромінювання, яка враховує кут падіння сонячного світла на нахилену поверхню фотоелектричних панелей. Рівняння для виходу сонячної енергії задається рівнянням (18):

$$P_{\text{PV},t} = \eta(\text{PV}) \cdot A_{\text{PV}} \cdot \text{GTI}_t \quad (18)$$

де $\eta(PV)$ - ефективність фотоелектричної системи. A_{PV} - площа фотоелектричної системи. $G_{TI}t$ - це глобальне нахилене опромінення в часі t .

2.2.5. Операційні обмеження

Вихідна потужність DG (Distributed Generation, розподілена генерація) повинна залишатися в межах її максимальної потужності, яка описується наступним обмеженням:

$$0 \leq P_{DG,t} \leq P^{\max} u_{DG,t}, \quad \forall t \in T \quad (19)$$

Де $u_{DG,t}$ – бінарна змінна, яка вказує, чи працює DG в момент часу t (1, якщо увімкнено, 0 - вимкнено). Темпи нарощування та спаду обмежують швидкість, з якою DG може збільшувати або зменшувати обсяги виробництва. Ці обмеження визначаються рівняннями (20) та (21):

$$P_{DG,t} - P_{DG,t-1} \leq R^{\text{вгору}}, \quad \forall t \in T \text{ and } P_{DG,t} \geq P_{DG,t-1} \quad (20)$$

$$P_{DG,t-1} - P_{DG,t} \leq R^{\text{вниз}}, \quad \forall t \in T \text{ and } P_{DG,t} < P_{DG,t-1} \quad (21)$$

Де $R^{\text{вгору}}$ та $R^{\text{вниз}}$ - максимальні темпи нарощування та спаду відповідно.

Після увімкнення розподільної генерації, вона повинна залишатися увімкненою протягом мінімального часу, і так само повинна залишатися увімкненою протягом мінімального часу, не вимикатися протягом мінімальної тривалості після вимкнення. Обмеження для мінімального часу безвідмовної роботи та час простою задаються рівняннями (22) та (23):

$$\sum_{k=t}^{\min(t+T_{\text{min-down}}-1, |T|)} u_{DGk} \geq T_{\text{min}} - u_{DG,t}, \quad \forall t \in T \quad (22)$$

$$\sum_{k=t}^{\min(t+T^{\min-up}-1, |T|)} (1 - u_{DG,k}) \geq T^{\min-down} (u_{DG,t} - 1 - u_{DG,t}), \quad \forall t \in T, \quad (23)$$

Де $T^{\min-up}$ і $T^{\min-down}$ - мінімальні вимоги до часу роботи і часу простою. Ці обмеження гарантують, що DG працює в межах своїх можливостей, не збільшує і не зменшує частоту обертання занадто швидко, а також підтримує мінімальний час роботи і простою для запобігання зносу генератора. Кожне обмеження забезпечує належні експлуатаційні обмеження для ефективної та надійної роботи DG в енергосистемі.

2.2.6. Регіональні обмеження щодо можливої експлуатації ТЕЦ

Електрична та теплова потужність когенераційної установки обмежена її продуктивністю. На рисунку 1 показано можливу зону роботи, що відображає взаємозв'язок між електричною та тепловою потужністю з урахуванням споживання палива та ККД. Точка А відповідає максимальній потужності при високому споживанні палива і мінімальному тепловиділенні, а точка В – максимальному тепловиділенню при зниженій потужності. Точка С показує збалансоване тепло- і електровиробництво, а точка D – мінімальне споживання палива при знижених потужностях. Діапазон між цими точками відображає різні співвідношення тепло- і електровиробництва, підкреслюючи гнучкість когенераційної установки в адаптації до змінних потреб в енергії при оптимізації паливної ефективності.

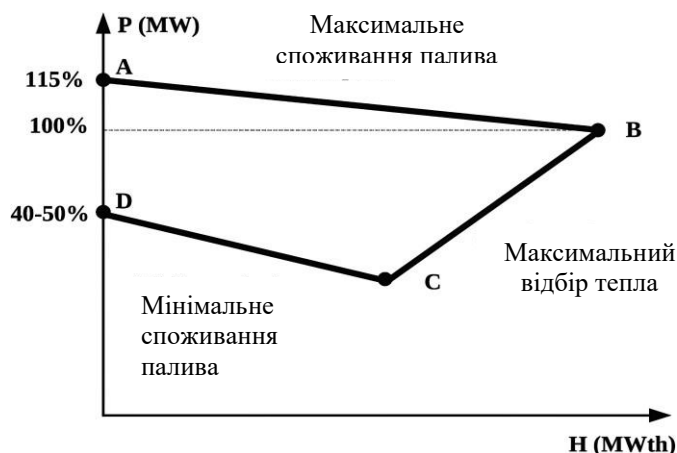


Рисунок 2. Регіон можливої експлуатації КГУ.

Виробництво електричної та теплової енергії на КГУ має бути максимально обмежене на мінімальні можливості цього пристрою. Ці обмеження моделюються за допомогою рівнянь (24) і (25).

$$P_{\text{ТЕЦ},t}^{\min} \leq P_{\text{ТЕЦ},t} \leq P_{\text{ТЕЦ},t}^{\max}, \quad \forall t \in T \quad (24)$$

$$H_{\text{ТЕЦ},t}^{\min} \leq H_{\text{ТЕЦ},t} \leq H_{\text{ТЕЦ},t}^{\max}, \quad \forall t \in T \quad (25)$$

Область допустимих операцій визначається набором лінійних нерівностей, які фіксують повторні зв'язки між електричною та тепловою потужністю, як показано у рівнянні (26):

$$a_i P_{\text{ТЕЦ},t} + b_i H_{\text{ТЕЦ},t} \leq c_i, \quad \forall t \in T, \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (26)$$

де, a_i b_i та c_i - константи, що визначають i -ту нерівність, n - кількість нерівностей, що утворюють опуклу область. Ці нерівності утворюють опуклий багатокутник у двох , що представляє можливі комбінації $P_{\text{ТЕЦ},t}$ та $H_{\text{ТЕЦ},t}$. Допустимий регіон ТЕЦ визначається обмеженнями (27) - (29):

$$P_{\text{ТЕЦ},t} , \quad H_{\text{ТЕЦ},t} \leq 1, \quad \forall t \in T \quad (27)$$

$$H_{\text{ТЕЦ},t} \geq \alpha_{\min} P_{\text{ТЕЦ},t} \quad \forall t \in T \quad (28)$$

$$H_{\text{ТЕЦ},t} \leq \alpha_{\max} P_{\text{ТЕЦ},t} \quad \forall t \in T \quad (29)$$

Де $\alpha_{\min}$ і $\alpha_{\max}$ - мінімальне і максимальне відношення тепла до потужності.

2.2.7. Обмеження реагування на попит

Українські програми включають в себе торги на потужність, ціноутворення за часом використання та прямі управління навантаженням. Програми реалізуються по-різному в ізольованих населених пунктах ніж у системах, підключених до електромережі. Замість того, щоб реагувати на зовнішні сигнали мережі ринкового ціноутворення, ці позамережні системи зосереджується на внутрішній структурі управління енергоспоживанням.

Наприклад, гірничодобувна промисловість може регулювати гнучке навантаження в періоди високого попиту на енергію або низької доступності відновлюваної енергії. Це може передбачати тимчасове скорочення споживання енергії для таких процесів, як видобуток руди, транспортування матеріалів з мінімальним або відкладеним впливом на загальне виробництво. Метою системи є оптимізація використання енергії шляхом регулювання не критичних процесів в пікові години, забезпечуючи операційну стабільність та мінімізуючи перебої в роботі до критичних операцій. Максимальна участь у програмах в ізольованих системах визначається внутрішнім енергетичним балансом, експлуатаційними обмеженнями та базовим рівнем, гарантуючи, що основні процеси залишаються безперебійними.

Зменшення попиту за допомогою програм обмежується максимальним потенціалом базового попиту, як це представлено у рівняннях (30), (31), (32):

$$0 \leq DR_{elec,t}^{elec} \leq \beta_{elec} P_{dem,t} \delta DR_t, \quad \forall t \in T \quad (30)$$

$$0 \leq DR_{тепло,t}^{heat} \leq \beta_{тепло} H_{dem,t} \delta DR_t, \quad \forall t \in T \quad (31)$$

$$0 \leq DR_{вода,t}^{вода} \leq \beta_{вода} W_{dem,t} \delta(DR)_t, \quad \forall t \in T \quad (32)$$

Де β_{elec} електроенергія, $\beta_{тепло}$ теплота $\beta_{вода}$ представляють максимальні відсотки скорочення для кожної секунди.

Крім того, $DR \in \{0,1\}$ - бінарна змінна, що вказує на активацію події DR в момент часу t . Активація DR базується на внутрішніх граничних витратах на виробництво електроенергії $C_{gen,t}$, ніж зовнішні ринкові цінові сигнали:

$$\delta^{DR} = \begin{cases} 1, & \text{if } C_{gen,t} \geq C_{threshold} \\ 0, & \text{інакше} \end{cases}, \forall t \in T \quad (33)$$

де $C_{gen,t}$ - внутрішні граничні витрати на виробництво електроенергії в момент часу t , які включають такі фактори, як витрати на паливо, ефективність генератора, наявність відновлюваних ресурсів, та поточного рівня попиту. $C_{threshold}$ - вартісний поріг для активації DR, що визначається на основі стратегій оптимізації витрат підприємства. Таке формулювання забезпечує, що програми активуються у відповідь на внутрішні системні умови, сприяючи оперативному реагуванню, та економічності, при збереженні безперебійної роботи важливими процесами. Узгоджуючи активацію DR з внутрішньою динамікою витрат, модель влучно відображає операційні пріоритети окремих населених пунктів.

2.2.8. Обмеження щодо зберігання тепла

Накопичення тепла дозволяє системі зберігати надлишкове тепло, що утворюється в періоди низького попиту, і віддавати його, коли попит зростає, тим самим зменшуючи залежність від традиційних теплогенераторів, таких як котли або системи когенерації. SOC теплового накопичувача оновлюється на основі даних про заряджання та розряджання відповідно до рівняння (34):

$$\begin{cases} SOC_{HS,0} + \eta_{ch} H_{ch} - \frac{H_{HS,t}^{HS}}{HS}, & t = 1 \\ SOC_{HS,t-1} + \eta_{ch} H_{ch} - \frac{H_{HS,t}^{HS}}{HS}, & t > 1 \end{cases} \quad (34)$$

Де H^{ch} та H^{dis} - швидкість заряджання та розряджання акумулятора тепла в момент часу t . η^{ch} та η^{dis} - ефективність заряджання та розряджання відповідно. Стан заряде тепло акумулятора завжди повинен залишатися в межах максимальної потужності системи, оскільки надається рівнянням (35):

$$0 \leq SOCHS,t \leq E^{\text{max}}, \quad \forall t \in T \quad (35)$$

Швидкість заряджання та розряджання обмежена відповідними лімітами згідно з рівняння (36) і (37):

$$0 \leq H_{HS,t}^{\text{ch}} \leq H_{HS}^{\text{ch,max}}, \quad \forall t \in T \quad (36)$$

$$0 \leq H_{HS,t}^{\text{dis}} \leq H_{HS}^{\text{dis,max}}, \quad \forall t \in T \quad (37)$$

Щоб запобігти експлуатаційним конфліктам, акумулятор тепла не може заряджатися і розряджатися одночасно. Це обмеження забезпечується рівнянням (38):

$$H^{\text{ch}} \cdot H^{\text{dis}} = 0, \quad \forall t \in T \quad (38)$$

2.2.9. Обмеження в роботі котла

Котел слугує звичайною теплогенеруючою установкою, забезпечуючи додаткову теплову енергію для задоволення потреб системи в опаленні, особливо в періоди, коли відновлюваного тепла або тепла, виробленого на ТЕЦ, недостатньо. Теплова потужність котла повинна залишатися в межах своєї мінімальної та максимальної пропускної здатності згідно з рівнянням (39):

$$H_{\text{Котел}}^{\text{min}} \leq H_{\text{Котел},t} \leq H_{\text{Котел}}^{\text{max}}, \quad \forall t \in T \quad (39)$$

Теплова потужність котла повинна змінюватися в межах збільшення зменшення, як показано нижче:

$$H_{\text{Котел},t} - H_{\text{Котел},t-1} \leq R^{\text{вгору}}, \quad \forall t \geq 2 \quad (40)$$

$$H_{\text{Котел},t-1} - H_{\text{Котел},t} \leq R^{\text{вниз}}, \quad \forall t \geq 2 \quad (41)$$

Піс

ля ввімкнення котел повинен залишатися в робочому стані протягом принаймні мінімального часу безвідмовної роботи. Аналогічно, після вимкнення котла він повинен залишатися вимкненим принаймні мінімум на час тривалості безвідмовної роботи. Ці обмеження задаються рівняннями (42) та (43):

$$\sum_{k=t}^{\min(t+T_{\text{min-down}}-1, |T|)} u_{\text{котел},k} \geq T_{\text{котел}} - u_{\text{котел},t}, \quad \forall t \in \quad (42)$$

$$\sum_{k=t}^{\min(t+T_{\text{min-down}}-1, |T|)} (1 - u_{\text{котел},k}) \geq T_{\text{котел}} - (u_{\text{котел},t-1} - u_{\text{котел},t}), \quad \forall t \in \quad (43)$$

Змінна запуску $u_{\text{Котел},t}$ визначається як різниця між станом котла при часу t і попередньому часовому кроку відповідно до рівняння (44):

$$v_{\text{котел},t} \geq u_{\text{котел},t} - u_{\text{котел},t-1}, \quad \forall t \in T \quad (44)$$

2.2.10. Обмеження водопостачання

Наступні обмеження забезпечують виробництво води від опріснення. Видобуток підземних вод та повторне використання води залишаються в межах їхніх потужностей. Кількість води, що виробляється на опріснювальній Переробка установки, обмежена W^{max} . Швидкість видобутку підземної води обмежується її максимально допустимою межею згідно з W^{max} . Кількість води, що повторно використовується, обмежується як потужністю рециркуляції, так і доступними стічними водами згідно з рівняннями (45) - (47):

$$0 \leq W_{\text{Desal},t} \leq W^{\text{max}}, \quad \forall t \in T \quad (45)$$

$$0 \leq W_{\text{ГВТ},t} \leq W^{\text{макс}}, \quad \forall t \in T \quad (46)$$

$$0 \leq W_{\text{Переробка},t} \leq W^{(\text{макс})}_{\text{Переробка}}, t \leq W_{\text{Стічні води},t} \quad \forall t \in T \quad (47)$$

Як сформульовано в рівнянні (45), потужність опріснювальної установки гарантує, що виробництво води з опріснювальної установки не перевищує її експлуатаційних обмежень. Обмеження видобутку підземних вод, сформульоване в рівнянні (46), обмежує видобуток до стійких рівнів. Згідно з рівнянням (47), потужність рециркуляції води обмежує кількість рециркульованої води потужністю установки і гарантує, що кількість рециркульованої води не перевищує доступну кількість стічних вод.

2.2.11. Моделювання критичних навантажень

В ізольованих локальних системах певні процеси є критично важливими для підтримання функціональності і безпеки. Ці процеси вимагають безперервного постачання електроенергії, незалежно від коливань у виробництві відновлюваної енергії, доступності палива або збої у системі. 20% від загального попиту становить визначене як критичне навантаження, що представляє основні експлуатаційні потреби, які не можуть бути. Критичні навантаження в локальних мережах - це важливі системи, які потребують безперервного електропостачання для забезпечення безпеки, ефективності та надійної роботи. Один з ключових прикладів це вентиляційні системи в підземних шахтах, які контролюють якість повітря і запобігають накопиченню небезпечних газів. Ці системи включають вентилятори, очищувачі повітря та детектори газу, які забезпечують безпеку персоналу. Іншим критичним навантаженням є системи перекачування та очищення води, необхідні для

підтримання постійного водопостачання для операційних процесів і пожежогасіння. Системи зв'язку також відіграють життєво важливу роль, дозволяючи координувати операції та реагувати на надзвичайні ситуації в ізольованому середовищі. Крім того, системи освітлення та аварійного реагування, включаючи сигналізацію та засоби евакуації, забезпечують безпеку під час перебоїв в електропостачанні. Нарешті, необхідна ІТ-інфраструктура підтримує моніторинг та контроль систем автоматизації, які мають вирішальне значення для оптимальної роботи та безпеки локальних систем для енергозабезпечення населених пунктів. Разом ці критичні навантаження в рамках енергетичної моделі визначені як пріоритетні для підтримки операційної безперервності та безпеки.

Для забезпечення надійності критичних навантажень ця модель енергоменеджменту визначає пріоритети постачання енергії до цих навантажень, навіть за несприятливих умов, таких як високий попит, невизначеність або обмеженість генеруючих потужностей. Це досягається шляхом включення обмежень які запобігають впливу необслуговуваної енергії на критичні навантаження, ефективно гарантуючи, що будь-який дефіцит енергії впливає лише на некритичні навантаження. Визначимо критичне навантаження $P_{crit,t}$ як фіксований відсоток β_{crit} від загального попиту, як показано нижче:

$$P_{crit,t} = \beta_{crit} \cdot P_{dem,t} \forall t \in T \quad (48)$$

Де β_{crit} - частка критичних навантажень (наприклад, $\beta_{crit} = 0.20$ для 20% критичних навантажень). Зазначимо, що для розрахунку не критичного навантаження $P_{noncrit,t}$ розраховується як різниця між сумарним та критичним попитом відповідно до рівняння (49):

$$P_{noncrit,t} = P_{dem,t} - P_{crit,t} \forall t \in T \quad (49)$$

Щоб гарантувати, що критичні навантаження завжди обслуговуються, ми накладаємо обмеження, яке обмежує кількість недовідпущеної енергії ENS^{elec} , яка повинна бути меншою або дорівнювати некритичному навантаженню $P_{noncrit}$, відповідно до рівняння (50):

$$ENS^{elec}_t \leq P_{noncrit,t} = (1 - \beta_{crit}) \cdot P_{dem,t} \cdot (1 + \delta), \quad \forall t \in T \quad (50)$$

Де δ - максимальне очікуване відхилення через невизначеність. Це гарантує, що навітьколи попит коливається через невизначеність, критичні навантаження залишаються повністю забезпеченими, а будь-який незадоволений попит обмежується некритичними навантаженнями. Для подальшого вдосконалення нашої моделі та забезпечення її практичної застосовності ми додали нове обмеження, яке обмежує заходи DR тільки некритичними навантаженнями. Ця модифікація гарантує, що критичні навантаження, необхідні для безпеки та безперебійної роботи, не будуть порушені заходами DR. Таким чином, обмеження, що враховує невизначеність, надається рівнянням (51):

$$DR^{elec}_t \leq P_{noncrit,t}, \quad \forall t \in T \quad (51)$$

Це гарантує, що DR на електроенергію не перевищує наявне некритичне навантаження в будь-який час доби.

2.3 Моделювання невизначеності

У реальних енергетичних системах невизначеності виникають через коливання обсягів виробництва відновлюваної енергії. Змінні потреби в енергії, волатильність цін на паливо та проблеми з надійністю обладнання, такі як незаплановані зупинки. Управління цими невизначеностями має вирішальне значення для енергозабезпечення населених пунктів під час війни, де надійне та безперебійне енергопостачання має важливе значення для забезпечення

операційної ефективності та економічної ефективності. Надійна оптимізація пропонує потужний математичний підхід, цьому розробляє ефективні рішення за таких невизначених умов. У цьому розділі представлена концепція робастної оптимізації, яка пояснює різне ставлення до ризику (несхильність до ризику, схильність до ризику, несприйнятливості до ризику), а також надає математичні формулювання для кожного з них, ілюструючи, як такий підхід покращує енергозабезпечення, та забезпечує безперервність в електропостачанні у локальних системах.

У цьому дослідженні ми використовуємо підхід міцної оптимізації для обробки невизначеностей у виробництві та попиту на відновлювану енергію. Замість того, щоб моделювати точні стохастичні процеси або часові кореляції таких змінних, як сонячне випромінювання та швидкість вітру, ми визначаємо тонкі межі невизначеності, які представляють максимальні очікувані відхилення від номінальних значень. Ці межі охоплюють діапазон можливих коливань через невизначеності. Надійна система оптимізації гарантує, що рішення залишаються здійсненними для всіх можливих реалізацій в межах заданого набору невизначеностей. Включаючи поля невизначеності до обмежень моделі, ми враховуємо найгірші сценарії, забезпечуючи консервативне і надійне рішення без необхідності в явному стохастичному моделюванні. Хоча ми визнаємо, що такі змінні, як сонячне випромінювання та швидкість вітру демонструють часові кореляції, міцний підхід до оптимізації ефективно пом'якшує вплив цих невизначеностей на продуктивність системи. Цей метод є особливо зручним для ізольованих або обмежених даними умовами, коли детальна ймовірнісна інформація може бути нестабільною.

2.3.1 Надійний підхід до оптимізації

Надійна оптимізація має на меті знайти рішення, які є здійсненними та оптимальними за всіх можливих реалізацій невизначеностей межах заздалегідь визначеного набору невизначеностей. Замість того, щоб для одного очікуваного

сценарію, надійна оптимізація шукає рішення, захищаючи від найгірших сценаріїв в межах набору невизначеностей. Такий підхід гарантує, що рішення є менш чутливими до варіацій, невизначених параметрів і забезпечує певний рівень впевненості в результативності системи в умовах невизначеності.

У нашому дослідженні ми використовуємо підхід надійного лінійного програмування (НЛП) для обробки невизначеності у виробництві та попиті на відновлювану енергію. Механізм НЛП модифікує детерміновані моделі лінійного програмування шляхом включення наборів невизначеностей для нечітких налаштувань обмежень всіх можливих значень у межах цих параметрів.

Якщо ми позначимо x , як вектор змінних рішень (наприклад, рівні генерації, обсяги зберігання). ξ як вектор невизначених параметрів (наприклад, відновлюваної генерації, рівні дефіциту). c як вектор коефіцієнтів витрат, A як матриці коефіцієнтів для обмежень, b як вектор правої частини. Задачу детермінованого лінійного програмування можна сформулювати як рівняння (52):

$$\begin{aligned} &\text{Мінімізувати } c^T x \\ &\text{За умови } Ax \geq b \end{aligned} \quad (52)$$

За наявності невизначеності обмеження стають залежними від невизначених параметрів, як це передбачено рівнянням (53):

$$A(\xi)x \geq b(\xi), \forall \xi \in \Xi \quad (53)$$

Задача робастної оптимізації має на меті знайти рішення x , яке мінімізує вартість, що задовольняє обмеженням для всіх можливих значень ξ в межах множини невизначеностей Ξ , як показано нижче.

$$\begin{aligned} &\text{Мінімізувати } c^T x \\ &\text{За умови дотримання } A(\xi)x \geq b(\xi), \forall \xi \in \Xi \end{aligned} \quad (54)$$

2.3.2 Визначення множини невизначеностей

В енергетичних системах невизначеності виникають через різні фактори, що впливають на системи, зокрема, на виробництво електроенергії з відновлюваних джерел та попит на неї. Виробництво електроенергії з відновлюваних джерел залежить від коливань сонячного випромінювання та швидкості вітру, які можуть змінюватися через погодні умови та інші зовнішні фактори. Аналогічно, коливання попиту відбуваються у споживанні електроенергії, тепла та води, що робить вкрай важливим врахування цих невизначеностей в моделі енергетичних систем.

Ми визначаємо набори невизначеностей для невідомих параметрів, використовуючи "бюджет невизначеності", що дозволяє контролювати рівень консерватизму в надійній моделі. Для кожного невизначеного параметра ξ_i ми задаємо номінальне значення $\hat{\xi}_i$ інтервал-достовірності $[\hat{\xi}_i - \Delta\xi_i, \hat{\xi}_i + \Delta\xi_i]$. Потім будується множина невизначеностей Ξ , яка включає всі можливі комбінації ξ_i в межах цих інтервалів, за умови дотримання бюджетного обмеження, яке обмежує загальне відхилення від номінальних значень. Наприклад, для невизначеного попиту, D_t набір невизначеностей можна визначити як рівняння (55):

$$D_t = \hat{D}_t + \delta_t \Delta D_t, \delta_t \in [-1, 1], t \in T \quad (55)$$

Де δ_t - відхилення від номінального попиту $\hat{D}_t$, а ΔD_t - це максимальна кількість дозволених відхилень.

2.4 Ставлення до ризику в робастній оптимізації

Ставлення до ризику в робастній оптимізації залежить від того, як обробляється невизначеність. Ставлення до ризику – це аверсивна оптимізація, яка мінімізує найгірші результати, пропонуючи дуже консервативні рішення, забезпечуючи їхню реалістичність за най несприятливіших умов. Воно

ідеальне, коли є критично важливим, а математичний підхід оптимізує максимально можливу вартість в умовах невизначеності. Ризик-нейтральна оптимізація збалансовує ефективність і ризик, на очікувані результати, а не на найгірші сценарії, що робить її придатною з невеликою невизначеністю. Тут метою є оптимізація очікуваних витрат без додаткових поправок на невизначеність. Оптимізація з урахуванням ризику приймає вищі ризики за потенційно кращу винагороду, зосереджуючись на максимізації потенційних вигод, навіть якщо це збільшує вразливість до невизначеності. Цей підхід використовується, коли потенційні вигоди переважають прийнятні ризики або невдачі.

2.4.1 Моделювання без ризику

У підході, спрямованому на уникнення ризиків, пріоритетом є забезпечення того, щоб місце видобутку постійно відповідало попиту на енергію, навіть в умовах невизначеності. Це досягається шляхом визначення консервативних невизначеностей Ξ , що включає екстремальні сценарії та застосування надійних обмежень, які діють для всіх $\xi \in \Xi$. Для забезпечення надійності може знадобитися збільшення потужностей, енергіїрозширення сховищ або більша залежність від керованих генеруючих одиниць. Таке консервативне планування гарантує, що система зможе впоратися з найгіршими сценаріями. Для оптимізації без урахування ризику метою є мінімізація максимально можливих загальних витрат для всіх сценаріїв в межах набору невизначеностей рівняння (56):

$$\min_{x \in X} \max_{\xi \in \Xi} \{ \text{Загальна вартість}(x, \xi) \} \quad (56)$$

Цей метод забезпечує найвищу надійність, гарантуючи енергопостачання навіть при найгірших сценаріях. Однак це призводить до вищих операційних витрат через консервативне планування. Це найкраще підходить, коли вартість

дефіциту енергії, наприклад, у виробництві надзвичайно високою.

2.4.2 Моделювання нейтрального підходу до ризику

Нейтральний до ризику підхід шукає баланс між надійністю та вартістю. Замість того, щоб планувати екстремальні умови, модель використовує очікувані значення невизначеностей або ймовірнісні сценарії за допомогою стохастичного програмування. Обмеження можуть бути пом'якшені, щоб відповідати очікуванням, а не кожним можливим результатом. Це дозволяє системі працювати добре в типових умовах, зберігаючи витрати нижчими, ніж у моделі, що уникає ризиків. У ризико-нейтральній оптимізації метою є мінімізація очікуваних загальних витрат, припускаючи, що невизначеності регулюються відомими розподілами ймовірностей рівняння (57):

$$\min E\xi[\text{Загальна вартість}(x, \xi)]. \quad (57)$$

Нейтральна до ризику стратегія оптимізує витрати при збереженні прийнятної надійності пропонує гнучкість, адаптацію до типових коливань попиту та пропозиції без надмірного інвестування в непередбачені обставини. Цей варіант підходить, коли невизначеності є помірними, а певний рівень ризику є прийнятним.

2.4.3 Моделювання з пошуком ризиків

Моделі, що враховують ризики, надають пріоритет економії витрат, приймаючи можливість енергії за несприятливих умов. Набір невизначеностей визначається оптимістично, на сприятливих сценаріях. Обмеження можуть допускати випадкові порушення, а система може зменшити залежність від дорогих резервних заходів, таких як великі запаси енергії. Такий підхід може призвести до зниження операційних витрат, але збільшує ймовірність енергетичних проблем з постачанням, якщо умови несподівано погіршаться. В оптимізації з урахуванням ризиків основна увага приділяється мінімізації загальних витрат за найсприятливіших сценаріїв відповідно до рівняння

$$\min_{\xi \in \Xi} \min\{\text{Загальна вартість}(x, \xi)\} \quad (58)$$

Ризик-орієнтований підхід знижує операційні витрати за рахунок мінімізації консервативних заходів, зосереджуючись на економії витрат. Однак це збільшує ризик дефіциту енергії за несприятливих умов. Це доречно, коли локальна система може витримати випадкові або має альтернативні стратегії пом'якшення наслідків у період війни та руйнування енергетичних об'єктів.

3. Вхідні дані та вихідні результати

3.1 Попит та вкладення у відновлювану енергетику

У локальних системах попит на електричну та теплову енергію є важливими компонентами операційної діяльності, особливо в ізольованих районах. Електроенергія необхідна для видобутку корисних копалин, обладнання, переробні заводи та допоміжну інфраструктуру, таку як освітлення, вентиляція, та транспортування. Потреба в теплі, яка часто використовується для сушіння матеріалів, підтримання комфортних, сприятливих умов праці, а також переробна діяльність, така як виплавка та рафінування, призведе до того, що можуть бути значними використання води в гірничодобувній промисловості значно варіюється в залежності від типу діяльності, причому певні гірничодобувні процеси є особливо водомісткими. Наприклад, операції з видобутку та переробки корисних копалин відкритим способом, особливо, як золото, мідь і літій, потребують значної кількості води. Ключові сфери водоспоживання включають переробку руди, де вода необхідна для дроблення, процеси подрібнення та флотації для вилучення мінералів з руди, а також пилопридушення, особливо у відкритих кар'єрах, де боротьба з пилом є значною проблемою. Крім того, на сьогоднішній день в Україні вода має важливе значення для управління сховищами, оскільки для обробки потрібні великі обсяги відходів, що залишаються після видобутку корисних копалин. Вода відіграє вирішальну роль у вилуговуванні та у гідрометалургійних процесах. Як наслідок, ми припустили, що видобуток корисних копалин у досліджуваній моделі є дуже ефективним.

У цьому розділі представлені вхідні дані для гібридної енергетичної системи гірничодобувного підприємства в Україні. Модель враховує потреби в електроенергії, теплі, воді та відновлюваних джерелах енергії, таких як сонячне випромінювання та швидкість вітру протягом 24 годин. Таблиця 1 підсумовує погодинні потреби в електроенергії, теплі, воді, сонячному випромінюванні та швидкості вітру.

Таблиця 1. Попит та внесок відновлюваної енергетики

Година .	Електрик аПопит (кВт)	Потре ба теплі (кВт)	Потре ба воді (м³)	Сонячне (кВт/м²)	Швид кість вітру (м/с)
1	600	150	100	0	6.0
2	550	145	95	0	5.5
3	500	140	90	0	6.8
4	450	135	85	0	4.5
5	400	130	80	0	5.0
6	1200	250	300	300	7.8
7	1500	300	350	400	6.7
8	1600	450	400	500	5.5
9	1800	500	450	600	6.2
10	2000	550	500	700	6.0
11	2200	600	550	800	6.0
12	2400	620	600	850	5.9
13	2500	650	650	800	5.5
14	2600	670	700	700	5.7
15	2700	690	730	600	5.0
16	2800	700	740	500	5.5
17	2750	670	730	400	6.5
18	2700	660	720	300	6.5
19	2600	620	710	200	7.0
20	2500	600	700	100	7.5
21	2000	580	600	0	6.5
22	1500	550	500	0	6.5
23	1000	500	400	0	7.5
24	800	450	350	0	8.0

Для ефективного впровадження запропонованого методу мінімізації витрат про детальні дані профілі попиту, відновлювані ресурси, технічні характеристики системи, вартісні параметри та операційні обмеження. Точні дані про попит на електроенергію, тепло та воду протягом планового періоду, а також дані про сонячне випромінювання та швидкість вітру необхідні для оцінки фотоелектричної та вітроенергетичної генерації. Дані про компоненти системи, такі як потужність, ефективність та експлуатаційні обмеження, мають вирішальне значення для точного моделювання. Параметри витрат, включаючи

витрати на паливо, експлуатаційні витрати, штрафи за незадоволений попит, суттєво впливають на результати. Розуміючи, що невизначеність даних може впливати на результати, ми включаємо граничні значення невизначеності в нашу надійну модель оптимізації та проводимо аналіз чутливості для варіацій параметрів процедури перевірки даних, такі як перехресні посилання на джерела та очищення даних, ще більше підвищують надійність, гарантуючи, що результати моделі є надійними та реалістичними.

3.2 Потужності системи та операційні витрати

Досліджувана тестова система являє собою ізольовану гібридну енергетичну систему, призначену для повторного підприємства з видобутку слюди в Україні. Цей гірничодобувний майданчик працює в автономному режимі, покладаючись повністю на місцевих енергоресурсах через недоцільність підключення до магістральних. Система поєднує в собі традиційну генерацію, відновлювані джерела енергії, та технології зберігання, щоб задовольнити об'єкти в електроенергії, теплі та воді. Система включає дизель-генератори (термоелектричні), когенераційні, вітрові та сонячної установки, які відображають доступність ресурсів та практичні потреби віддалених населених пунктах України, які постраждали від воєнної агресії. У таблиці 2 наведено структуру цін на дизельні генератори, КГУ та котельні відображено внутрішній облік витрат, а не зовнішнє ринкове ціноутворення. Структура ціноутворення поділяється на енергетичні компоненти, такі, як КГУ та котельні, на окремих локальних мережах відображається внутрішні операційні фактори, а не зовнішня динаміка ринку. Різниця між "піковими" та "непіковими" цінами відображає коливання цін на паливо, ефективність споживання та умови експлуатації:

- У періоди пікового попиту енергоблоки часто працюють з підвищеним навантаженням або майже на максимальну потужність. Це збільшує витрату палива на одиницю енергії через меншефективне згоряння та теплові втрати.

Крім того, більш високі експлуатаційні навантаження призводять до більшого зносу обладнання, збільшуючи потреби в технічному обслуговуванні та скороченні терміну служби обладнання, що призводить до збільшення операційних витрат.

- В ізольованих системах витрати на паливо можуть коливатися в залежності від логістичних проблем, таких як наявність паливопроводів або час та графік поставок палива. Ці фактори можуть спричинити коливання цін на паливо, впливаючи на внутрішні витрати виробництва енергії в різні періоди. Така система ціноутворення дозволяє ефективно управляти ресурсами та оптимізувати внутрішні енергетичні стратегії шляхом узгодження операційних рішень з витратами, що впливають на них. Різниця між піковими та непіковими витратами дає цінну інформацію про розподіл ресурсів, забезпечення економічно ефективного управління енергоспоживанням при збереженні системної надійності. Система WT розрахована на максимальну потужність 1500 кВт. У системі WT передбачено експлуатаційні характеристики вітрогенератора включаючи швидкість включання 3,5 м/с, номінальну швидкість 12 м/с і швидкість відключення 25 м/с, що забезпечує вироблення енергії в широкому діапазоні вітрових умов. Для традиційного виробництва електроенергії на гірничодобувному майданчику працює ДГ потужністю 1600 кВт. Когенераційна установка має електричну потужність 550 кВт і теплову потужність 300 кВт. Для задоволення потреб в опаленні на майданчику працює котел потужністю 350 кВт.

Системи водопостачання складаються з опріснення, видобутку підземних вод та переробки води. Видобуток підземних вод обмежений до 300 м³. Рециркуляція води встановлена на рівні максимальної місткості - 200 м³, тоді як водосховище має місткість 3000 м³. Системи зберігання та очищення води системи зберігання та очищення води забезпечують гнучкість в ефективному управлінні водними ресурсами. Програми DR для електроенергії, тепла та води допомагають оптимізувати використання ресурсів під час пікових навантажень

та непікових періодів. Ці витрати дозволяють об'єкту змінювати або скорочувати гнучке навантаження під час періодів підвищеного попиту, при цьому потужність обмежена 15% від загального попиту на електроенергію, тепло та воду. У години пікового навантаження (з 11:00 до 19:00) витрати на електроенергію та тепло становлять 2 долари за кВт-год, тоді як позапікові витрати становлять 1 долар за кВт-год. Для попиту на воду витрати становлять \$4 за м³ в години пік та \$2 за м³ в непікові години.

Системи зберігання забезпечують додаткову стійкість завдяки акумуляторним батареям та накопичувачам теплосистеми, що дозволяють перерозподіляти навантаження та балансувати енергію. Система акумуляторних батарей має ємність 2000 кВт-год. Ефективність заряджання та розряджання встановлена на рівні 95%. Аналогічно, система акумуляування тепла має потужність 1000 кВт-год з ефективністю зарядки та розрядки на рівні 90%. У Таблиці 2 наведені ключові потужності та витрати на виробництво енергії та ресурси для зберігання:

Потужність системи та характеристики палива					
Компонент	Потужність (кВт або м³)	Ефективність (%)	ЛГВ (БТЕ/одинаця)	Вартість пального (\$)	Логістичні витрати (\$)
Дизельний генератор	1600 кВт	30	36,645 (за літр)	2,5 за літр	0,1 на літр
ТЕЦ (електрична)	550 кВт	80	35 500 (за м³)	0,5 за м³	0,05 за м³
ТЕЦ (теплова)	300 кВт	80	35 500 (за м³)	0,5 за м³	0,05 за м³
Котел	350 кВт	85	42 700 (за літр)	1,0 за літр	0,08 за літр
Опреснювальна установка	300 м³	Н/Д	Н/Д	1,0 за м³	-
Підземні води	Обмеження 300 м³	Н/Д	Н/Д	3,0 за м³	-
Повторне використання води	200 м³	Н/Д	Н/Д	1,0 за м³	-
Параметри зберігання					

Система зберігання	Потужність (кВт-год або м³)	Ефективність (%)	Min SOC	Швидкість заряду / розряд у	Початковий SOC
Акумуляторна батарея	2000 кВт-год	95	200 кВт-год	400 кВт	800 кВт-год
Накопичувачі тепла	1000 кВт-год	90	150 кВт-год	150 кВт	400 кВт-год

Таблиця 2. Потужності системи та операційні витрати

Система моделюється як одновузлова мікромережа без детальних ліній передачі, що відображає компактний характер об'єкту. У години пік попит на енергію вищий, що призводить до збільшення залежності від дорогих дизельних генераторів та традиційних джерел енергії, що відображається на вищих операційних витратах. На противагу цьому, у непікові години спостерігається менший енергетичний дефіцит, що дозволяє більш ефективно виробляти енергію та зменшити залежність від традиційних джерел, що призводить до нижчих операційних витрат.

3.3 Невизначеність та вхідні дані для різних сценаріїв ризику

Система моделює невизначеність у попиті на електроенергію, тепло та воду, використовуючи різні сценарії (несхильність до ризику, нейтральність та схильність до ризику), з різним ступенем невизначеності. VOLL використовуються для кількісної оцінки вартості незадоволеного попиту.

Таблиця 3. Невизначеність та вхідні дані для сценаріїв

Сценарій	Невизначеність	Вартість втраченого навантаження для електроенергії	Вартість втраченого навантаження для тепла	Вартість втраченого навантаження для води
Не схильні до ризику	25%			
Нейтральний ризик	20%	4,32 UA/кВт-год	4,32 UA/кВт-год	30 UA/м³

Схильний до
ризиків 15%

У цьому дослідженні ми використовуємо єдину надійну оптимізаційну модель для обробки невизначеностей у виробництві та попиті на відновлювану енергію. Щоб дослідити вплив різних до ризику на продуктивність систем, ми проводимо аналіз сценаріїв в рамках цієї моделі, як показано в Таблиці 3. Ставлення до ризику, включаючи сценарії неохочості до ризику, нейтральності до ризику та прагнення до ризику, моделюється шляхом коригування маржі невизначеності (δ). Поля невизначеності представляють максимальні очікувані відхилення від номінальних значень для попиту на електроенергію, тепло, та воду. Вищі межі моделюють більшу невизначеність, що відповідає ставленню ризику, в той час як нижчі межі представляють меншу невизначеність, що відображає ставлення до ризику. Параметри VOLL кількісно оцінюють штрафні санкції за незадоволений попит; вищі значення надають пріоритет надійності, оскільки за ненадану енергію накладаються значні штрафні санкції. Основна модель залишається послідовною для всіх сценаріїв, гарантуючи, що відмінності в результатах пояснюються виключно змінами у ставленні до ризику, а не методами моделювання.

3.4 Результати та підсумки, що виключають ризик

У сценарії без ризику, як показано на Рисунку 3, ми спостерігаємо таку структуру виробництва електроенергії протягом 24 годин. Цей сценарій забезпечує високий рівень резервних потужностей для мінімізації ризику незадоволеного попиту. Джерела генерації включають ДГ, ВТ, PV-панелі, КГУ, акумуляторні батареї розвантаження та інші механізми. Стратегія уникнення ризиків спрямована на мінімізацію незадоволеного попиту та забезпечення високої надійності системи. Структура виробництва електроенергії, різноманітного використання різних ресурсів для задоволення попиту на електроенергію протягом 24 годин. Структура генерації електроенергії за

сценарієм, що виключає ризики, демонструє збалансований підхід щоб задовольнити попит. DR домінує в непіковій години, особливо з опівночі до ранку, що відображає залежність від традиційної теплової генерації для забезпечення базового навантаження коли відновлювані джерела обмежені. Вітроенергетика робить свій внесок у розвиток енергетики впродовж дня, з більшою продуктивністю рано вранці та пізно ввечері. Сонячна фотоелектрична генераторна станція має пік споживання протягом світлого часу доби, що значно зменшує навантаження на інші агрегати, але її внесок швидко зменшується перед заходом сонця, що свідчить про її переривчастість. КГУ забезпечують стабільну потужність протягом дня, постачаючи як електроенергію, так і тепло, забезпечуючи ефективність та збалансованість загального навантаження. Розрядка акумуляторів стратегічно використовується під час пікових навантажень, особливо в другій половині дня та на початку вечора. DR в основному застосовується в години піку, діючи як економічно ефективний механізм балансування попиту та пропозиції без додаткової генерації. Сценарій без ризику показує, що події активуються на високому рівні. У цьому році в Україні з'явився новий пристрій, який фокусується на підтримці надійності постачання та мінімізації будь-якого незадоволеного попиту. Як показано на Рисунку 4, у сценарії виробництва теплової енергії за ризик-незалежного підходу, ТЕЦ забезпечують стабільний базовий рівень виробництва тепла протягом дня, гарантуючи, що задовольняються основні потреби в опаленні. Внесок котлів стає все більш помітним під час середини дня до початку вечора, що відповідає підвищеному попиту на тепло. Системи зберігання розряджаються в пікові періоди, додатково, коли попит на нього є найвищим, що свідчить про стратегічне використання накопиченого тепла для уникнення надмірного навантаження на систему. DR використовується в другій половині дня та ввечері, особливо між 10 та 22, щоб обмежити попит на тепло в найбільш обмежені періоди. У цьому, не схильному до ризиків, варіанті ми спостерігаємо високу залежність від надійних джерел електроенергії, зокрема,

від ТЕС та ТЕЦ, які стабільно забезпечують базове навантаження протягом дня. ТЕЦ потужності максимізуються в години пікового навантаження для забезпечення надійності, особливо з огляду на сервісний характер підходу, що уникає ризиків. Розрядка акумуляторів відіграє незначну роль, забезпечуючи додаткову потужність у періоди пікового попиту, коли відновлювана генерація є недостатньою, і зберігає більше накопиченої енергії, щоб мінімізувати ризик незадоволеного попиту.

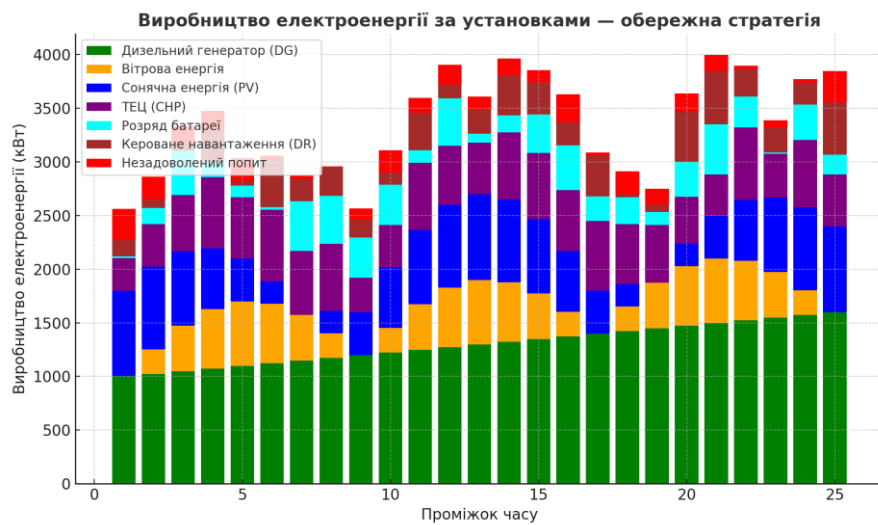


Рисунок 3. Виробництво електроенергії в прикладі, що не схильний до ризику.

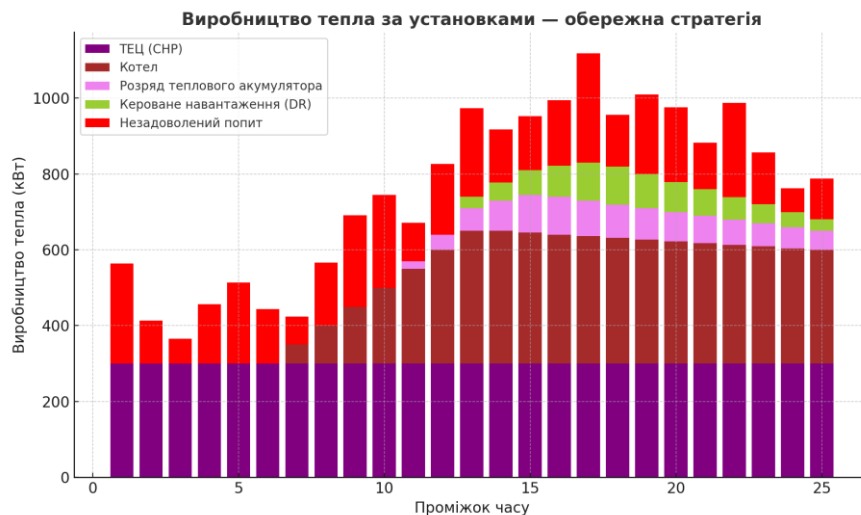


Рисунок 4. Виробництво теплової енергії, що не пов'язаний з ризиком.

Як показано на Рисунку 5, сценарій водопостачання за підходу, що уникає ризиків, має високі різноманітні джерела, що використовуються для задоволення потреб у воді протягом дня. Опріснення водита видобуток підземних вод забезпечують стабільне базове водопостачання, тоді як рециркуляція води збільшується у періоди підвищеного попиту, сприяючи сталому повторному використанню води. Вода розвантаження сховищ є ключовим елементом у підтримці постачання в години пікових навантажень, причому значний внесок акумульованої води для задоволення високого попиту в середині вдень і рано ввечері. DR активується в ці пікові періоди, щоб допомогти пом'якшити дефіцит води. Стратегія уникнення ризиків дозволяє значною мірою підтримувати безпеку водопостачання і допускає 25% невизначеності попиту та коливань у відновлюваних джерелах.

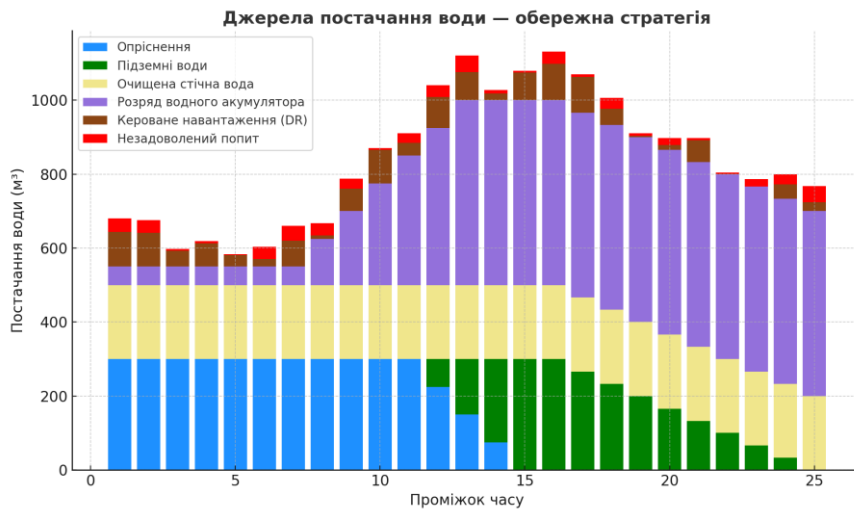


Рисунок 5. Джерела водопостачання в прикладі, що не схильний до ризику.

Як показано в Таблиці 4, за сценарієм, що уникає ризику, система віддає перевагу надійності, ніж загальним витратам. Операційні витрати значно вищі, ніж в інших сценаріях, щоб забезпечити відсутність незадоволеного попиту на електроенергію, тепло чи воду. Вартість DR

також дещо підвищена для підтримки стабільності поставок.

Таблиця 4. Розподіл витрат за сценарієм, що не пов'язаний з ризиком

Тип витрат	Загальна вартість	Операційні витрати	Логістичні витрати	Вартість штрафу	Вартість управління попитом
Вартість (USD)	54,014.71	44,103.65	1,195.08	0.0	8,715.98

3.4.2 Безризиковий кейс

Виробництво електроенергії, як показано на Рисунку 6, демонструє різноманітний енергетичний баланс дизель-генераторів, сонячної фотоелектрики, ТЕЦ, розрядки акумуляторів, та механізмів DR. Дизельні генератори відіграють вирішальну роль у непікові та пікові періоди, особливо вночі та рано вранці, коли відновлювані джерела обмежені. Вітроенергетика забезпечує стабільне постачання, допомагаючи зменшити залежність від дизельної генерації. Пік сонячної енергії припадає на полудень, компенсуючи більшу частину денного попиту і зменшуючи навантаження на інші джерела енергії. Використання ТЕЦ залишається постійним протягом дня, що відображає її подвійну роль у виробництві електроенергії та тепла. У сценарії з нейтральним рівнем ризику, дисконтні витрати на виробництво електроенергії та теплової енергії, режимів заряду як акумуляторної батареї, так і систем накопичення тепла починаються дещо раніше і демонструють вищі темпи скидів порівняно з ризик-нейтральним сценарієм. Цей зсув можна пояснити збалансованим підходом нейтральної до ризику стратегії між надійністю та економікою. На відміну від підходу, що виключає ризик, який надає пріоритет надійності, підтримуючи вищі резерви та відкладання використання батареї до крайньої необхідності, нейтральна до ризику стратегія оптимізує використання сховища для зменшення споживання пального та операційних витрат.

Ініціюючи розряд раніше, система використовує накопичену енергію для

задоволення попиту й одразу покладатися на паливну генерацію. Збільшення швидкості розряду вказує на те, щоготовність більшою мірою виснажувати сховища, використовуючи переваги економії витрат й накопичену енергію, зберігаючи при цьому помірний резерв на випадок непередбачуваного попиту.

Події DR застосовуються в пікові години. Тут система балансує між економічною ефективністю та надійністю, допускаючи певний рівень розрядки акумуляторів, використовуючи при цьому DR для гнучкого управління попитом. Така помірна у DR допомагає оптимізувати витрати, водночас зберігаючи певною мірою заряд батареї, досягаючи балансу між економією витрат та надійністю резерву.

У виробництві тепла, згідно з рисунком 7, когенераційні установки забезпечують базовий рівень тепла протягом усього дня, що свідчить про їх роль як надійного джерела тепла та електроенергії. Котли використовуються для забезпечення додаткового тепла, особливо в години пікового навантаження, що необхідно, коли когенераційні установки не можуть самостійно задовольнити весь попит на тепло. Тепло, накопичене в теплоаккумуляторах, використовується в післяобідній та вечірній час для задоволення пікового попиту. Це дозволяє системі оптимізувати використання енергії шляхом накопичення тепла, коли його багато, і вивільнення його під час пікових навантажень. Події DR для тепла використовуються переважно в другій половині дня та на початку вечора, коли система обмежує або переносить споживання тепла, щоб зменшити загальне навантаження на систему. У цьому випадку розряд акумулятора починається раніше, ніж за сценарієм несхильності до ризику.

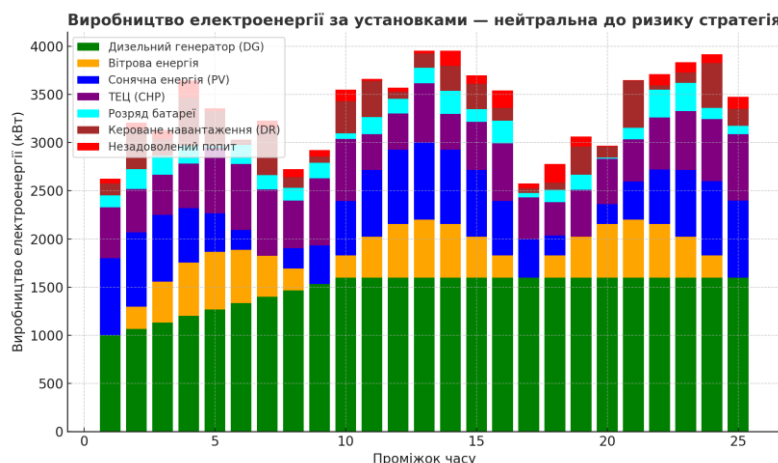


Рисунок 6. Виробництво електроенергії в нейтральному до ризику.

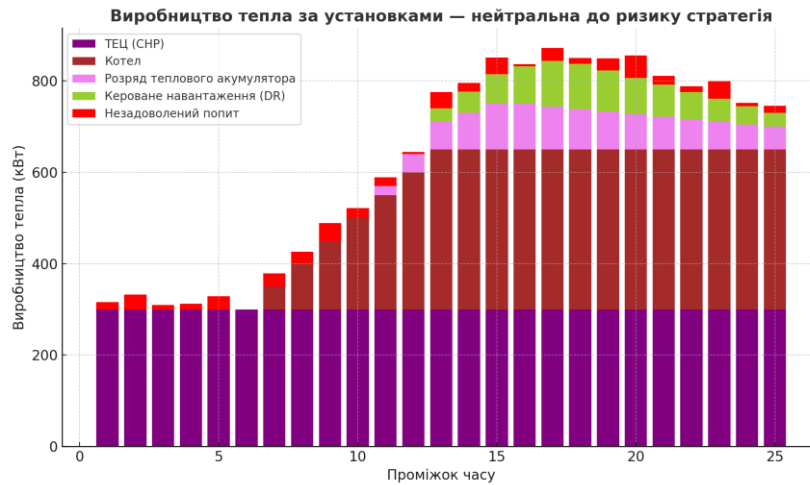


Рисунок 7. Виробництво теплової енергії в нейтральному до ризику прикладі.

Водопостачання, проілюстроване на Рисунку 8, показує, що основними джерелами води є опріснення, підземні води та повторно використана вода. Опріснення постійно сприяє збільшенню водопостачання, хоча його потужність обмежена. Підземні води та оборотна вода також забезпечують стабільне водопостачання протягом дня. Розподіл води зі сховищ відіграє ключову роль у задоволенні пікового попиту, особливо вдень та ввечері, коли попит є найвищим. У цьому контексті, водогосподарська система використовує механізми DR у ці пікові періоди для збалансування постачання та дефіциту ефективно виконувати свій мандат.

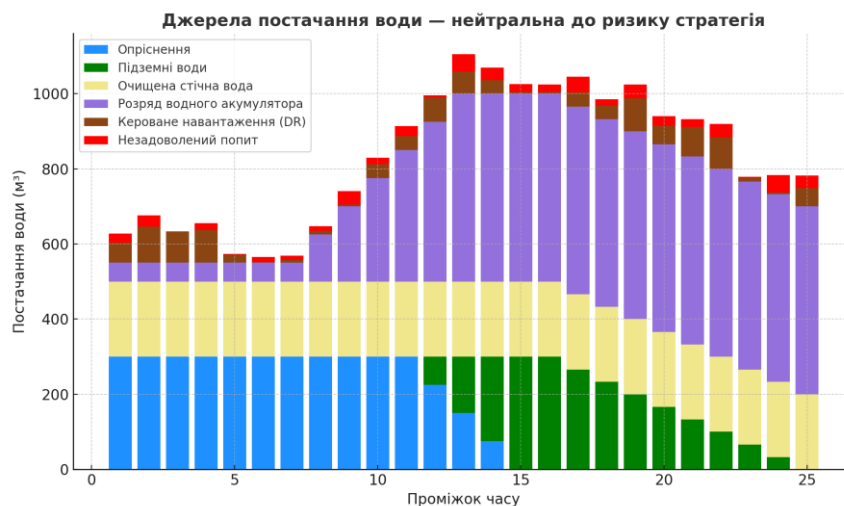


Рисунок 8. Джерела водопостачання у випадку з нейтральним ризиком.

Нейтральний до ризику сценарій забезпечує баланс між вартістю та надійністю системи, допускаючи до 10 % нестабільності в навантаженні та виробництві електроенергії з відновлюваних джерел. Загальна вартість є нижчою, ніж за сценарієм, не пов'язаним з ризиком, завдяки зниженню операційних та логістичних витрат, при цьому забезпечується відсутність незадоволеного попиту на електроенергію, тепло та воду. Вартість DR залишається незмінною за сценарієм, що не пов'язаний з ризиком, що відображає збалансований підхід між економічною ефективністю та підтримкою постачання.

Таблиця 5. Розподіл витрат для сценарію з нульовим рівнем ризику

Тип витрат	Загальна вартість	Операційні витрати	Логістичні витрати	Вартість штрафу	Вартість управління попитом
Вартість (USD)	49,633.64	41,172.54	1,176.33	0.0	7,284.77

У тематичному дослідженні з пошуку ризиків, показаному на рисунку 9, електро-, тепло- та водопостачання системи демонструють чіткий підхід до управління енергетичними ресурсами, віддаючи перевагу меншим запасам і прагнення мінімізувати витрати за рахунок потенційно незадоволеного попиту. Потужність результатів видобутку свідчать про меншу залежність від DR, ніж за сценарієм, що не передбачає ризиків, при цьому DR в основному працюють у непікові періоди. Вітрова та сонячна енергія роблять значний внесок до системи, особливо в середині дня, наголошуючи на використанні відновлюваних джерел енергії. Розряд батареї більш помітний у години піку, особливо з 10 до 22 години, щоб збалансувати попит і пропозицію, коли навантаження є найвищим. У цьому сценарії розрядка батареї починається раніше і використовується більш інтенсивно, що свідчить про бажання зменшити витрати, більше покладаючись на батарею, навіть з ризиком вичерпання резервів. Сценарій

пошуку ризиків демонструє найменшу участь у DR, з мінімальними зусиллями для забезпечення заряду батареї за рахунок регулювання попиту. Натомість, цей сценарій більше покладається від прямого розряду батареї, що дозволяє батареї більш вільно задовольняти попит. Цезнижена активація DR вказує на більшу толерантність до нижчих рівнів резервів, що узгоджується зстратегією пошуку ризиків, фокусується на економії витрат, а не на надійності. Що стосується виробництва теплової енергії, то як показано на рисунку 10, блоки ТЕЦ продовжують забезпечувати стабільне базове навантаження, в той час як котли доповнюють виробництво тепла в періоди пікового попиту. Відпуск тепла з теплоакумуюючих станційвідіграє важливу роль, особливо ближче до вечора, допомагаючи задовольнити підвищений попит у години пік.

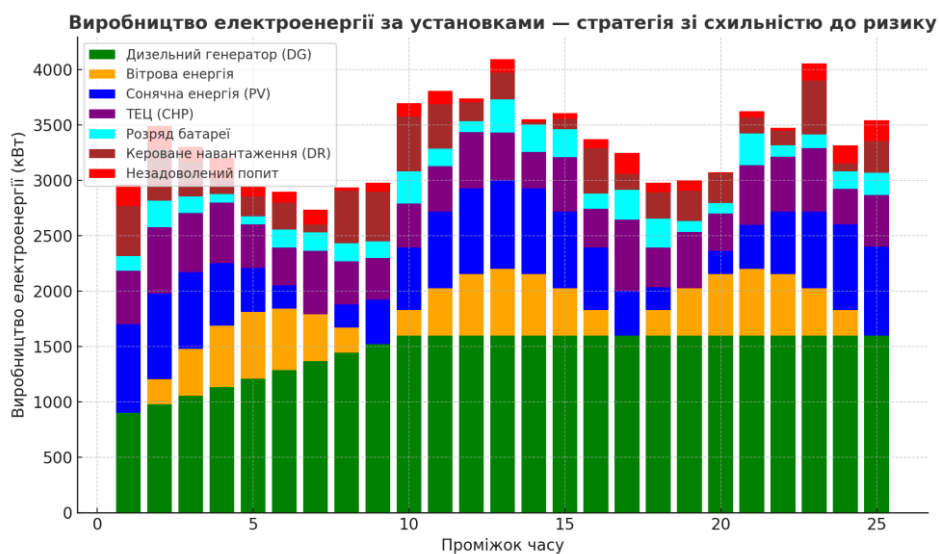


Рисунок 9. Виробництво електроенергії у з пошуку ризиків.

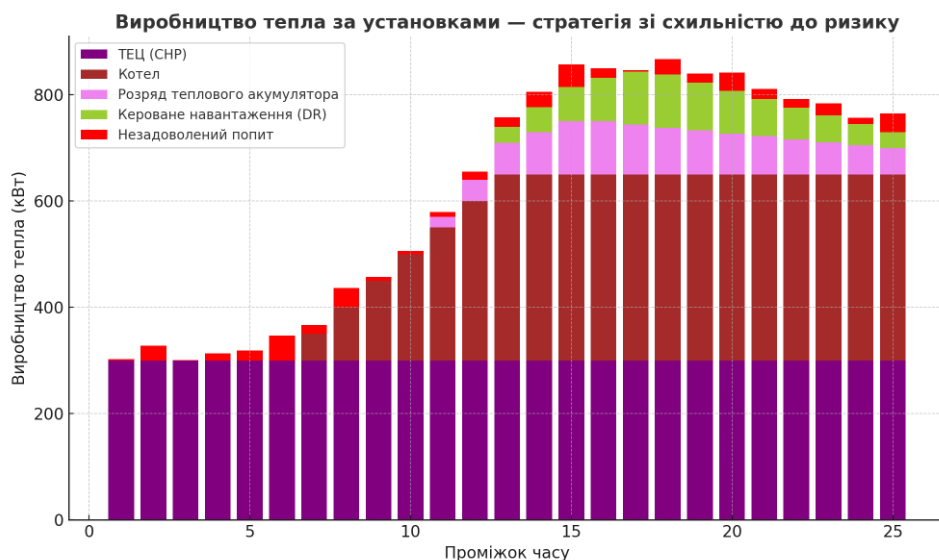


Рисунок 10. Виробництво теплової енергії у тематичному дослідженні, присвяченому пошуку ризиків.

Для водопостачання, як показано на рисунку 11, опріснення та видобутку підземних вод рівномірно вносять свій внесок протягом дня, а водосховища відіграють ключову роль у задоволенні попиту в години пікових навантажень. Це демонструє компроміс у підході, заснованому на пошуку ризиків, коли економія витрат досягається за рахунок роботи з меншими запасами, але система стає більш вразливою до дефіциту при задоволенні пікового попиту.

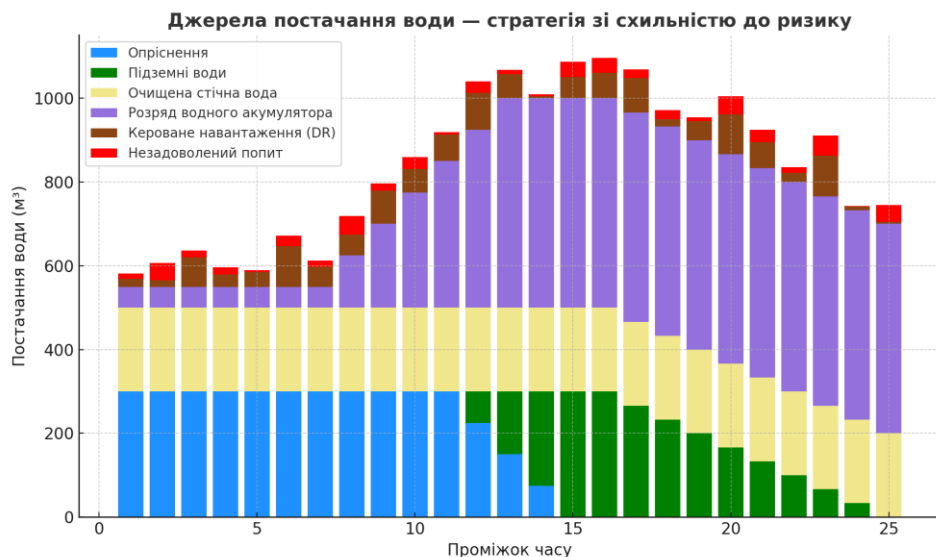


Рисунок 11. Джерела водопостачання в тематичному дослідженні з пошуку ризиків.

У сценарії пошуку ризику, згідно з таблицею 6, основна увага приділяється мінімізації витрат, які призводить до найнижчих загальних витрат серед усіх сценаріїв. Витрати на експлуатацію та логістику значно зменшуються, а витрати на DR є дещо нижчими, ніж в інших сценаріях. Незважаючи на мінімізацію витрат, системі все одно вдається задовольнити попит на електроенергію, тепло і воду, що свідчить про те, що надійність системи можна підтримувати на прийнятному рівні навіть за допомогою стратегій, спрямованих на пошук ризиків. Ця стратегія допускає 5%

невизначеності у вітровій та сонячній генерації, а також коливаннях електроенергії, тепла та води.

Таблиця 6. Розподіл витрат для сценарію пошуку ризиків

Тип витрат	Загальна вартість	Операційні витрати	Логістичні витрати	Вартість штрафу	Вартість управління попитом
Вартість (USD)	45,340.80	38,401.14	1,148.49	0.0	5,791.17

3.4.3 Порівняння зберігання електроенергії, тепла та води

На рисунках 12, 13 і 14 ми представляємо рівні стану заряду акумулятора, накопичувача тепла та систем зберігання води протягом 24-годинного періоду. Ці цифри наочно демонструють нарахування цикли розвантаження систем зберігання. Крім того, на рисунках 12, 13 і 14 представлено порівняльний аналіз рівня зберігання води, тепла та акумуляторних батарей в умовах ризику стратегії уникнення, нейтральні до ризику та стратегії пошуку ризику.

Як показано на рисунку 12, з 1-ї до 10-ї години стан заряду постійно зростає у всіх випадках, що вказує на фазу заряджання, коли надлишкова енергія накопичується в акумуляторі. Після 10-ї години стан заряду починає знижуватися, оскільки акумулятор розряджається для задоволення попиту в пікові періоди, причому для кожного сценарію ризику спостерігаються різні швидкості розряджання. У сценарії з уникненням ризиків рівень заряду батареї залишається вищим протягом усього дня, особливо в години пікового попиту та за наявності непередбачуваних сонячних умов. Ця стратегія надає пріоритет надійності, зберігаючи більше ємності батареї, щоб забезпечити її здатність впоратися з несподіваними коливаннями або дефіцитом, що призводить до більш поступового розряджання та вищого загального рівня заряду. Стратегія нейтрального ризику демонструє помірний характер розряджання, при якому рівень заряду батареї є дещо нижчим, ніж у стратегії, що уникає ризиків, але зберігаючи стабільний запас. Акумулятор починає розряджатися раніше, ніж у

сценарії, що уникає ризиків, балансує економію витрат і надійність. Стратегія, що прагне ризику, демонструє найшвидший розряд, при якому рівень заряду акумулятора швидко падає, оскільки стратегія надає пріоритет мінімізації витрат над підтриманням високих запасів. Такий підхід призводить до нижчих рівнів заряду акумулятора в години пікового навантаження, що відображає толерантність до більшого ризику та потенційних дефіцитів енергії.

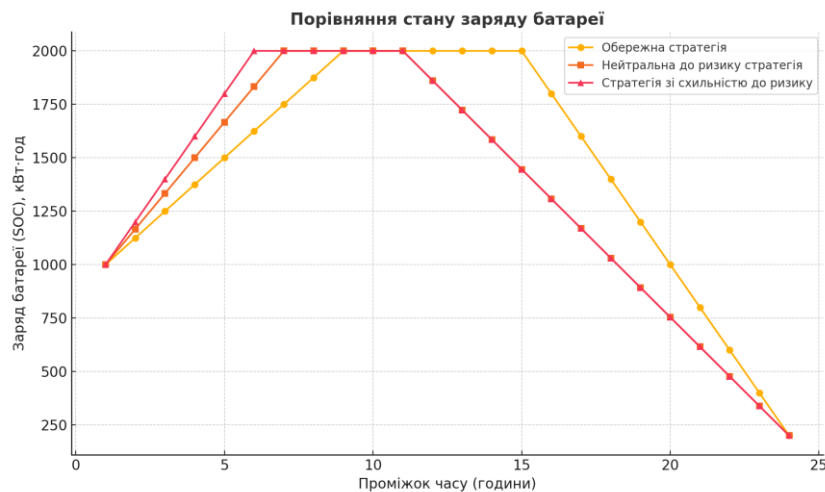


Рисунок 12. Порівняння акумуляторних батарей у тематичних дослідженнях.

Порівняння стану накопичення теплоти заряду на Рисунку 13 демонструє чіткі відмінності між зарядом фази входження, нейтральності та розрядки між ризикованими, нейтральними та схильними до ризику методами протягом 24-годинного періоду. З 1 до 5 години стан заряду постійно зростає, що вказує на фазу заряджання, оскільки надлишкове тепло зберігається в години низького попиту. Між 5 та 10 годинами стан заряду залишається стабільним, що відображає нейтральну фазу, коли накопичувач не заряджається і не розряджається, зберігаючи свою ємність для подальшого використання. З 10 до 20 години SOC зменшується, оскільки накопичувач тепла розряджається, щоб задовольнити піковий попит. Крім того, як показано на Рисунку 13, сценарій, що не передбачає ризику, у рівні накопичення тепла знову відображає більш

консервативне використання ресурсів, підтримуючи вищі рівні накопиченого тепла протягом більш тривалого часу. Підхід, що не передбачає ризику, слідує за ним, але дещо зменшує накопичене тепло в міру того, як він просувається через період пікового попиту. Однак, стратегія, орієнтована на ризик, має тенденцію до більш агресивного відпуску накопиченого тепла, виснажуючи резерв швидше і раніше, ніж інші стратегії.

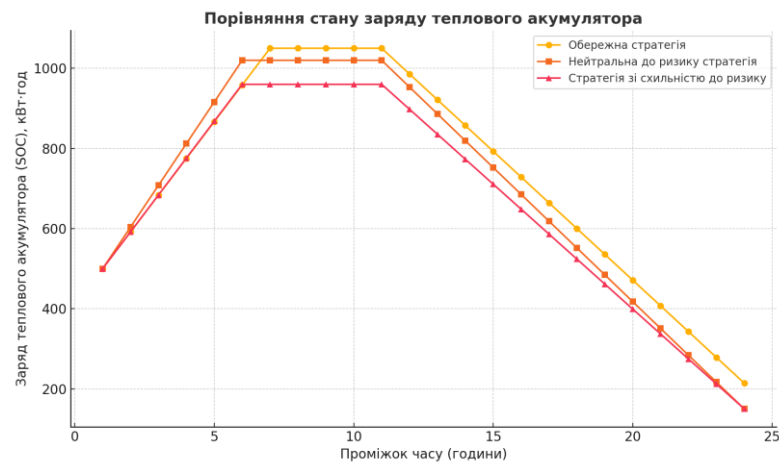


Рисунок 13. Порівняння систем акумулювання тепла у конкретних прикладах.

Порівняння рівнів водосховищ на Рисунку 14 ілюструє чітке розмежування між нарахуванням та скиданням води.

Етапи нарахування платежів за стратегіями уникнення ризику, нейтрального ставлення до ризику та пошуку ризику понад 24-годин. З 1 по 9 годину рівень накопичення води зростає, що вказує на фазу заряджання, де зберігаються надлишки води для підготовки до пікових навантажень. З 11-ї до 20-ї години рівні зберігання значно знижуються, оскільки система скидає накопичену воду, щоб задовольнити високий попит. Як показано на Рисунку 14, у стратегії, що уникає ризику, рівні зберігання води залишаються вищими протягом дня, що відображає консервативний підхід, спрямований на забезпечення достатнього резерву. Цей підхід надає пріоритет надійності,

підтримуючи вищий резерв зберігання води для управління потенційною невизначеністю попиту або перебоями в постачанні. В рамках проекту "Вода для життя" стан заряду досягає піку раніше і розряджається більш поступово, демонструючи, що система готова до непередбачуваних подій. Нейтральна до ризику стратегія представляє помірний стан заряду, балансує між економічною ефективністю та надійністю. Він підтримує постійний запас, але передбачає дещо нижчий пік і більш виражений розряд порівняно з підходом, що не передбачає ризику. Цей збалансований підхід задовольняє попит без надмірних запасів. Стратегія пошуку ризику показує найбільш швидке скидання, де вода швидше знижується. Ця стратегія спрямована на мінімізацію витрат шляхом прийняття нижчого рівня резервів, більше покладаючись на коригування в режимі реального часу, ніж на підтримання високого запасу. Внаслідок цього водосховище досягає нижчого рівня швидше, ніж у інші дві стратегії.

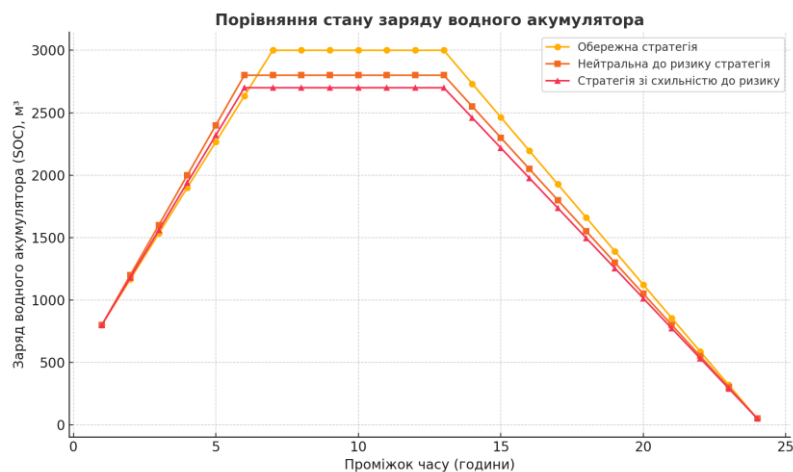


Рисунок 14. Порівняння сховищ води у тематичних дослідженнях.

3.4.4 Аналіз чутливості

У Таблиці 7 наведено порівняльний аналіз витрат за трьома різними сценаріями ризику: уникнення ризику, нейтрального ризику та пошук ризику. У таблиці загальна сума витрат поділена на, логістичні, штрафні та витрати на

DR, щоб показати фінансові наслідки кожного підходу ризику.

Таблиця 7. Аналіз витрат за різними сценаріями

Тип витрат	Відмова від ризику (USD)	Безризиковий (USD)	Схильний до ризиків (USD)
Загальна вартість	54,014.71	49,633.64	45,340.80
Операційні витрати	44,103.65	41,172.54	38,401.14
Логістичні витрати	1,195.08	1,176.33	1,148.49
Вартість штрафу	0.0	0.0	0.0
Вартість управління попитом	8,715.98	7,284.77	5,791.17

Загальні та операційні витрати є найвищими у сценарії без ризику (54 014,71 доларів США та 44 103,65 доларів США відповідно) завдяки консервативному підходу, який надає пріоритет надійності на підтримання вищих резервів, тоді як сценарій пошуку ризиків показує найнижчий загальний показник (45 340,80 доларів США) та експлуатаційних витрат (38 401,14 доларів США), погодившись на нижчу надійність. Логістичні витрати, які включають транспортування та перевалку палива, мінімально відрізняються між сценаріями, що свідчить про стабільність, на яку не впливає ставлення до ризику. Примітно, що витрати на штрафи залишаються нульовими в усіх варіантах. Це означає, що кожна стратегія ефективно задовольняє вимоги попиту, не спричиняючи кільцевих штрафів за незадоволений попит. Витрати на DR відрізняються більш суттєво: сценарій, що уникає ризику, несе найвищі витрати на DR (8 715,98 дол. США), що відображає його залежність від DR програми збалансування попиту та резервних потужностей, в той час як сценарій пошуку ризику, на мінімізацію витрат, призводить до менших витрат на DR (5 791,17 дол. США). Цей аналіз недооцінює компроміси між надійністю та економічною ефективністю: вищі витрати в стратегії уникнення ризику для

забезпечення надійності контрастують з економією витрат в стратегії пошуку ризику.

Рисунки 15 та 16 ілюструють чутливість загальних витрат та незадоволеного попиту на електроенергію до зростаючого рівня невизначеності попиту на електроенергію, що позначається як маржа невизначеності. Як зазначено, маржа невизначеності зростає до 0,28, загальні витрати демонструють очевидне лінійне зростання, що відображає додаткові витрати, понесені системою при управлінні вищим рівнем невизначеності. Система стає дорожчою в експлуатації зі зростанням невизначеності, що свідчить про те, що потрібно більше ресурсів (наприклад, резервних потужностей або заходів з боку попиту), щоб впоратися з коливаннями попиту на електроенергію. Цікаво, що незадоволений попит на електроенергію залишається відносно рівномірним до тих пір, поки коефіцієнт невизначеності не досягне 0,28. Після цієї точки спостерігається різке зростання незадоволеного попиту, що означає, що система намагається ефективно задовольнити попит, оскільки невизначеність стає більш вираженою. Це різке зростання також корелює зі стрімкішим зростанням загальних витрат.

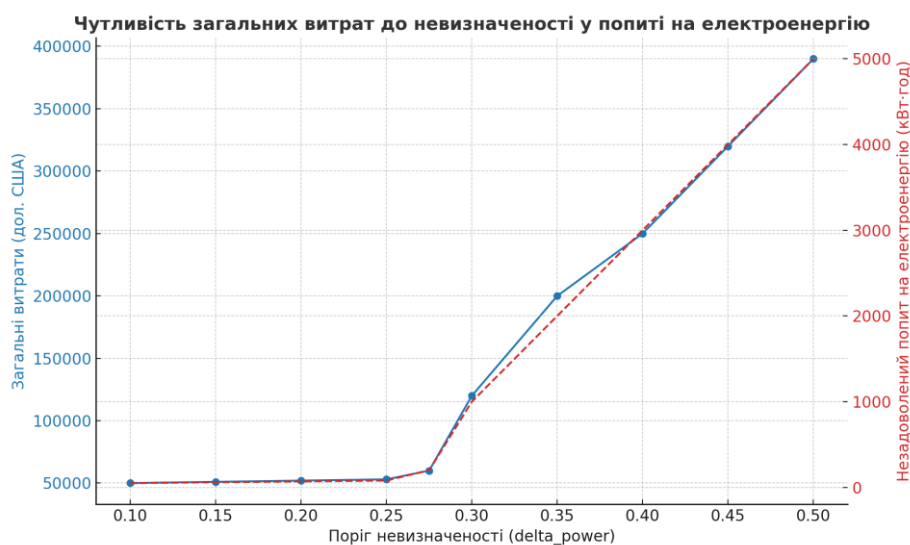


Рисунок 15. Аналіз чутливості 3D загальної вартості.

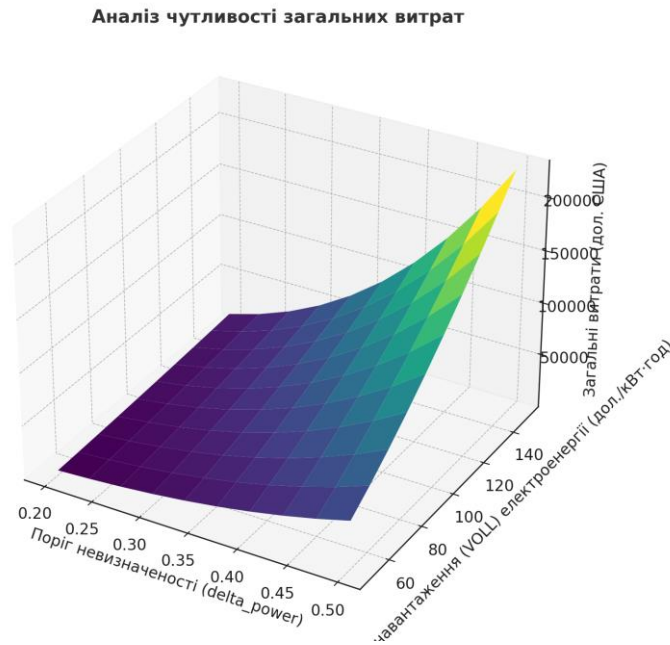


Рисунок 16. Лінійний аналіз чутливості загальних витрат до невизначеності попиту на електроенергію.

Ця тенденція підкреслює чутливість системи до невизначеності з пороговим значенням близько 0,28, за межами якого надійність значно знижується. Поза цим порогом додаткові невизначеності призводять до непропорційно високих витрат і незадоволеного попиту, підкреслюючи важливість управління невизначеністю в розумних межах для збереження економічної ефективності та надійності системи.

3.4.5 Основні переваги, обмеження та перспективи методу

Дослідження представляє структуровану систему, яка інтегрує управління ризиками в оперативному плануванні гібридних енергетичних систем, розроблених спеціально для ізольованих середовищ, локальних систем в Україні. Такий підхід пояснює різниці ставлення до ризику і дозволяє особам, які приймають рішення, адаптувати стратегії до конкретної надійності та вподобання щодо витрат. Завдяки включенню поправки на невизначеність, модель ефективно враховує невизначеності у виробництві та попиті на відновлювану енергію, забезпечуючи реалістичні рішення за різними

сценаріями. Модель оптимізує загальні операційні витрати шляхом інтеграції відновлюваної енергетики та енергоресурсів, традиційних генеруючих установок, зберігання енергії та стратегій сталого енергетичного розвитку, забезпечення комплексного підходу до управління енерго та водопостачанням для ізольованих об'єктів. Ця можливість робить його особливо придатним для ізольованих або обмежених даних середовищ, де можуть переважати невизначеності, а традиційні імовірнісні дані можуть бути обмежені.

поведінку компонентів системи. Крім того, точність моделі залежить від надійних вхідних даних, таких як: неточності в прогнозах попиту, доступності відновлюваних ресурсів або параметрів системи відмов, часу ремонту, і пріоритезація навантаження на основі надійності значно підвищила б реалістичність.

Інтеграція цих факторів, ймовірно, вимагатиме довгострокових моделей планування, що враховують середній час між відмовами, профілактичне та коригувальне технічне обслуговування, а також обмеження ресурсів технічного обслуговування, що виходить за рамки цього короткострокового 24-годинного дослідження оперативного планування.

Майбутня робота може підвищити реалістичність та застосовність моделі шляхом включення часових кореляцій у виробництво відновлюваної енергії та попит за допомогою стохастичного програмування або аналізу на основі сценаріїв. Валідація моделі за допомогою реальних даних з ізольованих гібридних енергетичних систем дозволить ще більше уточнити точність параметрів, привівши модель до практичних умов. Розширення сфери застосування моделі з метою включення таких компонентів, як електричні вантажівки та вдосконалене управління попитом, підвищило б універсальність у задоволенні зростаючих потреб в енергії. Нарешті, алгоритми машинного та глибокого навчання, а також обчислювальні методи могли б покращити масштабованість, підтримуючи застосування добільш складних систем та

підвищити корисність моделі для комплексного стратегічного планування та інвестицій за допомогою аналізу чутливості та сценаріїв.

4. ОХОРОНА ПРАЦІ

Розділ з охорони праці бакалаврської роботи присвячений дослідженню умов праці електротехнічного персоналу, що виконує моделювання стану локальних електричних мереж під час інтегрування відновлювальних джерел енергії. Наразі зі зростанням темпів розвитку сучасного виробництва значно зростає роль і значення охорони праці на підприємстві. Про це йдеться, зокрема в Законі України «Про охорону праці». Законодавством України установлені соціальні гарантії у сфері охорони праці найманих працівників, які потрібно виконувати в обов'язковому порядку.

Під час аналізування та проєктування, згідно [1, 2], на електротехнічний проєктний персонал впливають такі шкідливі виробничі фактори: фізичні, хімічні та трудового процесу:

фізичні фактори: мікроклімат (температура, вологість, швидкість руху повітря); виробничий шум, ультразвук, інфразвук; освітлення: природне (недостатність), штучне (недостатня освітленість, прямий і відбитий сліпучий відблиск тощо);

хімічні фактори: речовини хімічного походження, аерозолі фіброгенної дії (пил); фактори трудового процесу: важкість (тяжкість) праці; напруженість праці. Важкість праці характеризується рівнем загальних енергозатрат організму або фізичним динамічним навантаженням, загальною кількістю стереотипних робочих рухів, робочою позою, переміщенням у просторі. Напруженість праці характеризують: сенсорні, емоційні навантаження, ступінь монотонності навантажень.

4.1 Технічні рішення з безпечної експлуатації обладнання

4.1.1 Вимоги електробезпеки до приміщень з комп'ютерами

Площа, виділена для одного робочого місця повинна складати не менше 6 кв. м, а об'єм – не менше 20 куб м.

Під час проектування СЕС, систем електропостачання тощо ПВЕ, ПТЕ, ПБЕ ЕЕС, НАОП, а також розділів ДБН, що стосуються штучного освітлення та електротехнічних пристроїв, та вимог нормативно-технічної і експлуатаційної документації заводів виробників комп'ютерів. Комп'ютери та устаткування для обслуговування, ремонту та їх налагодження, інше устаткування (апарати управління, контрольно-вимірювальні прилади, світильники, тощо) електропроводи та кабелі за виконанням та ступенем захисту мають відповідати класу зони за ПВЕ, мати апаратуру захисту від струму короткого замикання та інших аварійних режимів.

Під час монтажу та експлуатації приміщень з ПК необхідно повністю унеможливити виникнення електричного джерела загоряння внаслідок короткого замикання та перевантаження проводів, обмежувати застосування проводів з легкозаймистою ізоляцією і, за можливості, перейти на негорючу ізоляцію. Під час ремонту ліній електромережі шляхом зварювання, паяння та з використанням відкритого вогню необхідно дотримуватися Правил пожежної безпеки в Україні. Лінія електромережі для живлення комп'ютерів, їх периферійних пристроїв та устаткування для обслуговування, ремонту та налагодження виконується як окрема групова трипровідна мережа, шляхом прокладання фазового, нульового робочого та нульового захисного провідників. Нульовий захисний провідник використовується для заземлення (занулення) електроприймачів. Використання нульового робочого провідника як нульового захисного провідника забороняється.

Нульовий захисний провід прокладається від стійки групового розподільчого щита, розподільчого пункту до розеток живлення. Не допускається підключення на щиті до одного контактного затискача нульового робочого та нульового захисного провідників. Площа перерізу нульового робочого та нульового захисного провідника в груповій трипровідній мережі повинна бути не менше площі перерізу фазового провідника. Усі провідники повинні відповідати номінальним параметрам мережі та навантаження, умовам

навколишнього середовища, умовам розподілу провідників, температурному режиму та типам апаратури захисту, вимогам ПВЕ. У приміщені, де одночасно експлуатується або обслуговується більше п'яти персональних комп'ютерів, на помітному та доступному місці встановлюється аварійний резервний вимикач, який може повністю вимкнути електричне живлення приміщення, крім освітлення.

Комп'ютери та устаткування для їх обслуговування, ремонту та налагодження повинні підключатися до електромережі тільки з допомогою справних штепсельних з'єднань і електророзеток заводського виготовлення. Штепсельні з'єднання та електророзетки крім контактів фазового та нульового робочого провідників повинні мати спеціальні контакти для підключення нульового захисного провідника. Конструкція їх має бути такою, щоб приєднання нульового захисного провідника відбувалося раніше ніж приєднання фазового та нульового робочого провідників. Порядок роз'єднання при відключенні має бути зворотним. Необхідно унеможливити з'єднання контактів фазових провідників з контактами нульового захисного провідника.

Неприпустимим є підключення комп'ютерів та їх устаткування для обслуговування, ремонту та налагодження до звичайної двопровідної електромережі, в тому числі – з використанням перехідних пристроїв. Електромережі штепсельних з'єднань та електророзеток для живлення комп'ютерів та устаткування для їх обслуговування, ремонту та налагодження слід виконувати за магістральною схемою, по 3 - 6 з'єднань або електророзеток в одному колі. Штепсельні з'єднання та електророзетки для напруги 12 В та 36 В за своєю конструкцією повинні відрізнятися від штепсельних з'єднань для напруги 127В та 220В. Штепсельні з'єднання та електророзетки, розраховані на напругу 12 В та 36 В, мають бути пофарбовані в колір, який візуально значно відрізняється від кольору штепсельних з'єднань, розрахованих на напругу 127 В та 220 В.

Індивідуальні та групові штепсельні з'єднання та електророзетки

необхідно монтувати на негорючих або важкогорючих пластинах з урахуванням вимог ПВЕ та Правил пожежної безпеки в Україні. Електромережу штепсельних розеток для живлення комп'ютерів та їх устаткування для обслуговування, ремонту та налагодження при розташуванні їх уздовж стін приміщення прокладають по підлозі поряд зі стінами приміщення, як правило, в металевих трубах і гнучких металевих рукавах з відводами відповідно до затвердженого плану розміщення обладнання та технічних характеристик обладнання. При розташуванні в приміщенні за його периметром до 5 комп'ютерів, використанні трипровідникового захищеного проводу або кабелю в оболонці з негорючого або важкогорючого матеріалу дозволяється прокладання їх без металевих труб та гнучких металевих рукавів.

Металеві труби та гнучкі металеві рукави повинні бути заземлені. Заземлення повинно відповідати вимогам ДНАОП 0.00-1.21-98 "Правила безпечної експлуатації електроустановок споживачів". Для підключення переносної електроапаратури застосовують гнучкі проводи в надійній ізоляції. Тимчасова електропроводка від переносних приладів до джерел живлення виконується найкоротшим шляхом без заплутування проводів у конструкціях машин, приладів та меблях. Доточувати проводи можна тільки шляхом паяння з наступним старанним ізолюванням місць з'єднання.

Є неприпустимими:

- експлуатація кабелів та проводів з пошкодженою або такою, що втратила захисні властивості за час експлуатації, ізоляцією; залишення під напругою кабелів та проводів з неізольованими провідниками;
- застосування саморобних подовжувачів, які не відповідають вимогам до переносних електропроводок;
- застосування для опалення приміщення нестандартного (саморобного) електронагрівального обладнання або ламп розжарювання;
- користування пошкодженими розетками, розгалужувальними та з'єднувальними коробками, вимикачами та іншими електровиробами, а також

лампами, скло яких має сліди затемнення або випинання.

- підвішування світильників безпосередньо на струмопровідних проводах, обгортання електроламп і світильників папером, тканиною та іншими горючими матеріалами, експлуатація їх зі знятими ковпаками (розсіювачами);

- використання електроапаратури та приладів в умовах, що не відповідають вказівкам (рекомендаціям) підприємств-виготовлювачів.

Х.1.2 Електробезпека

Живлення силового обладнання та системи освітлення здійснюється від чотирьохпровідної трифазної мережі 380 х 220В (фазна напруга (фаза – "0") – 220В, а міжфазна лінійна (фаза – фаза) – 380В).

Технічні рішення щодо запобігання електротравмам: для запобігання електротравм від контакту з нормально-струмовідними елементами електроустаткування, необхідно: розміщувати неізольовані струмовідні елементи в окремих приміщеннях з обмеженим доступом, у металевих шафах; використовувати засоби орієнтації в електроустаткуванні - написи, таблички, попереджувальні знаки; підвід кабелів до споживачів здійснювати у закритих конструкціях підлоги;

- при живленні однофазних споживачів струму від трипровідної мережі при напрузі до 1000 В використовується нульовий захисний провідник. При його використанні пробій на корпус призводить до КЗ. Спрацьовує захист від КЗ і пошкоджений споживач відключається від мережі. Згідно з вимогами нормативів, повинна бути забезпечена необхідна кратність струму К.З. залежно від типу запобіжного пристрою, повинна бути забезпечена цілісність нульового захисного провідника.

- електрозахисні засоби захисту. Електротехнічний персонал повинен бути забезпечений випробуваними засобами захисту. Перед застосуванням засобів захисту персонал зобов'язаний перевірити їх справність, відсутність зовнішніх пошкоджень, очистити і протерти від пилу, перевірити за штампом дату наступної перевірки. Забороняється користуватися засобами захисту,

термін придатності яких вийшов.

Використовуються основні та допоміжні електрозахисні засоби. Основними електрозахисними засобами називаються засоби, ізоляція яких тривалий час витримує робочу напругу, що дозволяє дотикатися до струмопровідних частин, які знаходяться під напругою. До них відносяться (до 1000В): ізолювальні штанги; ізолювальні та струмовимірювальні кліщі; покажчики напруги; діелектричні рукавиці; слюсарно-монтажний інструмент з ізольованими ручками.

Додатковими електрозахисними засобами називаються засоби, які захищають персонал від напруги дотику, напруги кроку та попереджають персонал про можливість помилкових дій. До них відносяться (до 1000 В): діелектричні калоші; діелектричні килимки; переносні заземлення; ізолювальні накладки і підставки; захисні пристрої; плакати і знаки безпеки.

4.2 Технічні рішення з гігієни праці і виробничої санітарії

4.2.1 Мікроклімат

Мікроклімат приміщення – це сукупність фізичних параметрів повітря в виробничому приміщенні, які діють на людину в процесі праці на її робочому місці, в робочій зоні.

Нормуються параметри мікроклімату в виробничих приміщеннях та гранично допустимі концентрації шкідливих речовин в повітрі робочої зони. Тяжкість роботи розділяється на категорії залежно від загальних енерговитрат організму, ккал/с (Вт). Робота проєктувальників відноситься до легкої фізичної роботи категорія Ia, бо вони практично весь свій робочий день проводить сидячи. Параметри мікроклімату в приміщенні наведено в таблиці 4.1.

Таблиця 4.1 – Нормування параметрів мікроклімату

Період року	Категорія робіт	Температура, °С	Відносна вологість	Швидкість руху
Теплий	Ia	22-28	55 при 28°С	0,1-0,2
Холодний	Ia	21-25	75 при 25°С	Не більше 0,1

Для забезпечення необхідних за нормативами параметрів мікроклімату на робочому місці оператора крану передбачається:

- в холодну пору року – використання калорифера;
- в літню пору – застосування кондиціонерів та вентиляторів обдуву, провітрювання приміщень.

4.2.2 Склад повітря робочої зони

Забруднення повітря робочої зони регламентується концентраціями (ГДК) в мг/м. В умовах роботи на граничнодопустимих концентраціях можливими забруднювачами повітря робочої зони можуть бути пил та шкідливі гази, їх ГДК наведено в таблиці 4.2.

Таблиця 4.2 – Гранично допустимі концентрації шкідливих речовин у повітрі робочої зони

Назва речовини	ГДК, мг/м ³		Клас небезпечності
	Максимально разова	Середньо добова	
Вуглецю оксид (CO)	3	1	4
Пил нетоксичний	0,5	0,15	4

Для забезпечення складу повітря робочої зони передбачено:

Провітрювання приміщень;

Цілісність конструкції кабіни та вікон для перешкоджання попадання пилу в приміщення кабіни під час роботи установки;

Встановлення пиловловлюючих засобів.

4.2.3 Виробниче освітлення

Раціональне освітлення – один з основних факторів створення сприятливих робочих умов праці. Недостатнє освітлення викликає передчасне стомлення працюючих, знижує продуктивність праці, може стати причиною нещасного випадку.

Для забезпечення найбільш сприятливих умов зорової праці нормують мінімальну освітленість на найбільш темній ділянці робочої поверхні. Рівень аварійного освітлення складає 15% освітленості основної роботи. Приміщення забезпечене природним освітленням в денний проміжок часу, але вечері постає проблема в штучному освітленні.

Для забезпечення найбільш сприятливих умов зорової праці нормуємо освітлення на робочому місці працівника.

Характеристика зорових робіт - середньої точності.

Відповідно до ДБН В.2.5-28-2018 розряд зорової роботи IV, підрозряд «в». Норми при штучному, природньому та суміщеному освітленні наведено в таблиці 4.3.

Таблиця 4.3 – Вимоги до освітлення приміщень виробничих підприємств

Харак-ка зорової роботи	Найменший або еквівалентний розмір об'єкта розрізнення, мм	Розряд зорової роботи	Під-розряд зорової роботи	Контраст об'єкта з фоном	Характеристика фону	Штучне при системі комбінованого освітлення		Природне Ен пр	Сумісне Е сум
						всього	у т. ч. від загального		
Середньої точності	Від 0,5 до 1,0 включно	IV	в	малий середній великий	світлий середній темний	400	200	4	2,4

Для забезпечення достатнього освітлення здійснюють систематичне очищення скла та світильників від пилу (не рідше двох разів на рік), використовують жалюзі. В разі нестачі природного освітлення, використовують загальне штучне освітленням, що створюється за допомогою світлодіодних ламп E27 LED 15W NW A60 "SG". Висота підвісу світильників над робочою

поверхнею 2,5 метра.

При експлуатації здійснюється контроль за рівнем напруги освітлювальної мережі, своєчасна заміна перегорілих ламп, забезпечується чистота повітря у приміщенні. Для забезпечення нормативних значень освітлення передбачено:

- використання додаткового штучного освітлення, а саме світлодіодних ламп;
- необхідна кількість природного світла (великі вікна);
- для підтримки постійної освітленості повинно бути організовано систематичне, не рідше двох разів на місяць, очищення арматури світильників і ламп від пилу та бруду, а в приміщеннях із значним виділенням пилу, диму та кіптяви - не рідше чотирьох разів на місяць згідно з графіком.

4.2.4 Виробничий шум

Для відносної логарифмічної шкали в якості нульових рівнів обрані показники, що характеризують мінімальний поріг сприйняття звуку людським вухом на частоті 1000 Гц. Нормативним документом, який регламентує рівні шуму для різних категорій робочих місць службових приміщень, є «ССБТ. Шум Загальні вимоги безпеки».

Норми звукового тиску на постійних робочих місцях в промислових приміщеннях наведено в таблиці 4.4.

Таблиця 4.4 – Рівень звукового тиску

Характер робіт	Допустимі рівні звукового тиску (дБ) в стандартизованих октавних смугах з середньгеометричними частотами, Гц								
	32	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
Постійні робочі місця в промислових приміщеннях	107	95	87	82	78	75	73	71	69

Для забезпечення допустимих параметрів шуму в приміщенні, проектом

передбачено засоби колективного захисту: акустичні, архітектурно-планувальні й організаційно-технічні. Засоби боротьби із шумом в залежності від числа осіб, для яких вони призначені, поділяються на засоби індивідуального захисту і на засоби колективного захисту - «ССБТ. Засоби індивідуального захисту органів слуху. Загальні технічні умови і методи випробувань» і «Засоби і методи захисту від шуму. Класифікація».

Для зниження шуму в приміщенні, необхідно:

- безпосередньо біля джерел шуму використовувати звукопоглинаючі матеріали для покриття стелі, стін, застосовувати підвісні звукопоглиначі.
- для боротьби з вентиляційним шумом потрібно застосовувати мало шумові вентилятори.

4.3 Пожежна безпека

Пожежну безпеку промислових і інших об'єктів регламентують Правила пожежної безпеки в Україні [11, 12]. Пожежо- вибухонебезпечність речовин і матеріалів визначається за ДСТУ 8829: 2019 [13], за якою визначається категорія приміщень за вибуховою та пожежною безпекою [14].

Отже, до складу системи електропостачання, яка проєктується, входять підстанції, приміщення яких за вибухонебезпечною та пожежонебезпечною відносяться до категорії Д – речовини і/або матеріали, що зазначені вище для категорій приміщень В (крім горючих газів, горючих пилу і/або волокон), а також негорючі речовини і/або матеріали в холодному стані (за температури навколишнього середовища), за умов, що приміщення, в яких знаходяться (зберігаються, переробляються, транспортуються) зазначені вище речовини і/або матеріали, не відносяться до категорій А, Б або В з зонами П-Іа, де є тверді горючі речовини чи матеріали.

Пожежо- вибухонебезпечність речовин і матеріалів – сукупність властивостей, що характеризують їхню здатність до виникнення і поширення горіння. Наслідком горіння, залежно від його швидкості та умов протікання,

можуть бути пожежа або вибух. Пожежо- вибухонебезпечність речовин і матеріалів визначають показниками, вибір яких залежить від агрегатного стану речовини (матеріалу), та умов їхнього застосування.

Будівлі, в якій розташовані ці приміщення, характеризується II ступенем вогнестійкості. До II ступеня вогнестійкості відносяться будинки з несучими та огорожувальними конструкціями з природних або штучних кам'яних матеріалів, бетону, залізобетону із застосуванням листових і плитних негорючих матеріалів. Мінімальні межі вогнестійкості будівельних конструкцій (у хвиликах) та максимальні межі поширення вогню по них (см) за ДБН В.1.1.7-2016 [15] наведено в таблиці 4.6.

Таблиця 4.6 – Мінімальні межі вогнестійкості будівельних конструкцій та максимальні межі поширення вогню по них

Ступінь вогнестійкості і будинків	Мінімальні межі вогнестійкості будівельних конструкцій (у хвиликах) і максимальні межі поширення вогню по них (см)								
	стіни				коло-ни	сходові площадки, костури, сходи, балки, марші сходових кліток	пере-криття між поверхів (у т.ч. горищні та над підвалами)	елементи суміщених покриттів	
	несучі та сходових кліток	само-несучі	зовнішні не-несучі	внутрішні не-несучі (перегородки)				плити, насти-ли, прого-ни	балки, ферми, арки, рами
II	REI 120 M0	REI 60 M0	E 15 M0	E1 15 M0	R 120 M0	R 60 M0	REI 45 M0	RE 15 M0	R 30 M0

Протипожежні перешкоди і мінімальні межі їх вогнестійкості за ДБН В.1.1.7-2016 [15] наведено в таблиці 4.7.

Протипожежні відстані між житловими, громадськими, адміністративно-побутовими будинками промислових підприємств, гаражами слід приймати за таблицею 4.8 (чисельник). В умовах забудови, що склалася, протипожежні відстані між житловими будинками та від житлових будинків до будівель і споруд іншого призначення слід визначати згідно з протипожежними вимогами

даних норм, наведеними у таблиці 6.8. Протипожежні відстані від житлових, громадських, адміністративно-побутових будинків промислових підприємств, гаражів до виробничих, складських будинків і споруд слід приймати за таблицею 4.8 (знаменник) [15].

Таблиця 4.7 – Протипожежні перешкоди та мінімальні межі їх вогнестійкості

Протипожежні перешкоди	Типи проти-пожежних перешкод або їх елементів	Мінімальна межа вогнестійкості протипожежної перешкоди (у хвиликах)	Тип заповнення прорізів, не нижче	Тип протипожежного тамбур-шлюзу, не нижче
Стіни	3	REI 45	2	2
Перегородки	2	EI 15	3	2
Перекриття	3	REI 45	2	1

Таблиця 4.8 – Протипожежні відстані між житловими, громадськими, адміністративно-побутовими будинками промислових підприємств, гаражами, а також до виробничих будинків, будівель і споруд

Ступінь вогнестійкості будинку	Відстані при ступені вогнестійкості будинків, м		
	I, II	III	IIIa, IIIб, IV, IVa, V
I, II	6/9	8/9	10/12

На території підстанцій встановлено до 18 порошкових вогнегасників ВВП-8 (ВП-5) і 9 газових вогнегасників ВВК-7 [16].

Висновки

Енергосистеми у віддалених районах локальної електроенергетичної системи, все частіше стикаються з проблемами інтеграції відновлюваних джерел енергії та управління невизначеністю, яку вони створюють у попиті та постачанні електроенергії. Уміру поширення таких переривчастих джерел енергії, як вітер і сонце, управління цією невизначеністю стає критично важливим для забезпечення надійності та економічної ефективності системи. Гібридні енергетичні системи, що поєднують відновлювані джерела енергії, традиційні технології генерації та технології зберігання, є потенційним рішенням цієї проблеми. Однак їх оптимальна робота залежить від ефективного усунення ризиків, пов'язаних із мінливістю попиту та переривчастю генерації. У бакалаврській роботі представлено структуровану модель для оцінки співвідношення витрат і ефективності гібридних енергетичних систем з акцентом на управлінні ризиками в різних сценаріях невизначеності. Для оцінки впливу запропонованого методу на операційні рішення, моделювання невизначеності та загальні витрати системи було використано три підходи до ризику: уникнення ризику, нейтральне ставлення до ризику та прагнення до ризику. За допомогою DR, зберігання енергії та відновлюваної генерації ми аналізуємо, як кожен підхід впливає на продуктивність системи та витрати при різних рівнях толерантності до ризику. Результати показують, що для досліджуваної структури енергосистеми стратегія уникнення ризику надає пріоритет надійності шляхом підтримання вищих резервів, що призводить до вищих витрат, але дозволяє вирішити проблему невизначеності до 28 відсотків. Навпаки, стратегія пошуку ризику знижує витрати, приймаючи 15-відсотковий ризик невизначеності, що знижує надійність системи. Підхід нейтрального ставлення до ризику забезпечує баланс між витратами та надійністю. Крім того, аналіз чутливості ілюструє, як невизначеність попиту на електроенергію суттєво впливає на прийняття рішень в управлінні гібридними енергетичними

системами. Використані моделі невизначеності були ефективними для відображення впливу невизначеностей у визначених межах. Подальше розширення цієї роботи полягатиме в удосконаленні спрощеної моделі з метою включення стохастичних процесів, часових кореляцій та валідації за допомогою реальних даних для підвищення її точності та застосовності. У висновку даної роботи представлено надійну, засновану на даних модель оптимізації управління гібридними енергетичними системами в умовах невизначеності, підкреслюючи важливу роль управління ризиками в забезпеченні балансу між вартістю та надійністю, особливо в ізольованих регіонах, де енергетична стійкість має вирішальне значення.

Список використаної літератури

1. ДСНіП «Гігієнічна класифікація праці за показниками шкідливості та небезпечності факторів виробничого середовища, важкості та напруженості трудового процесу». Наказ МОЗ № 248 від 08.04.2014.
2. ДСТУ-Н Б А 3.2-1: 2007 Настанова щодо визначення небезпечних і шкідливих факторів та захисту від їх впливу при виробництві будівельних матеріалів і виробів та їх використання в процесі зведення та експлуатації об'єктів будівництва. URL: <https://profidom.com.ua/a-3/a-3-2/824-dstu-n-b-a-3-2-12007-nastanova-shhodo-viznachenna-nebezpechnih-i-shkidlivih-faktoriv->.
3. ДНАОП 1.1.10-1.01-97 Правила безпечної експлуатації електроустановок. URL: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page?id_doc=21826.
4. ДСТУ Б В.2.5-82:2016. Електробезпека в будівлях і спорудах. Вимоги до захисних заходів від ураження електричним струмом. К. : ДП «УкрНДНЦ», 2016. 109 с.
5. НПАОП 40.1-1.32-01 (ДНАОП 0.00-1.32-01) Правила будови електроустановок. Електрообладнання спеціальних установок. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/rada/show/v0272203-01#Text>.
6. ДСН 3.3.6.042-99 Санітарні норми мікроклімату виробничих приміщень. URL: <http://mozdocs.kiev.ua/view.php?id=1972>.
7. ДБН В.2.5-67:2013. Опалення, вентиляція та кондиціонування. К. : Мінрегіонбуд України, 2013. 149 с.
8. ДБН В.2.5-28:2018 Природне і штучне освітлення. URL: http://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=79885
9. ДСН 3.3.6.037-99 Санітарні норми виробничого шуму, ультразвуку та інфразвуку. URL: <http://document.ua/sanitarni-normi-virobnichogo-shumu-ultrazvuku-ta-infrazvuku-nor4878.html>.
10. ДСН 3.3.6.039-99. Державні санітарні норми виробничої загальної та

локальної вібрації. URL: <http://zakon2.rada.gov.ua/rada/show/va039282-99>.

11. НАПБ А.01.001-14. Правила пожежної безпеки в Україні. К. : МВС України, 2014. 47 с.

12. ДСТУ 8828:2019 Пожежна безпека. Загальні положення. URL: <https://dwg.ru/dnl/15125>.

13. ДСТУ 8829:2019 Пожежовибухонебезпечність речовин і матеріалів. Номенклатура показників і методи їхнього визначення. Класифікація. URL: <https://www.alutal.com.ua/wp-content/uploads/2021/02/dstu-8829-2019-1.pdf>.

14. ДСТУ Б В.1.1-36:2016 Визначення категорій приміщень, будинків та зовнішніх установок за вибухопожежною та пожежною небезпек. URL: https://dbn.co.ua/load/normativy/dstu/dstu_b_v_1_1_36/5-1-0-1759.

15. ДБН В.1.1-7:2016 Пожежна безпека об'єктів будівництва. Загальні вимоги. URL: http://www.poliplast.ua/doc/dbn_v.1.1-7-2002.pdf.

16. R. Holloway et al., "Optimal location selection for a distributed hybrid renewable energy system in rural Western Australia: A data mining approach," *Energy Strategy Reviews*, vol. 50, p. 101205, 2023.

17. H. Mori, "State-of-the-art overview on data mining in power systems," in *2006 IEEE PES Power Systems Conference and Exposition*, 2006: IEEE, pp. 33-34.

18. H. Soleimani, D. Habibi, M. Ghahramani, and A. Aziz, "Strengthening Power Systems for Net Zero: A Review of the Role of Synchronous Condensers and Emerging Challenges," *Energies*, vol. 17, no. 13, p. 3291, 2024.

19. M. Ghahramani, M. Sadat-Mohammadi, M. Nazari-Heris, S. Asadi, and B. Mohammadi-Ivatloo, "Introduction and literature review of the operation of multi-carrier energy networks," *Planning and operation of multi-carrier energy networks*, pp. 39-57, 2021.

20. Y. Shi, H. Wang, C. Li, M. Negnevitsky, and X. Wang, "Stochastic optimization of system configurations and operation of hybrid cascade hydro-wind-photovoltaic with battery for uncertain medium-and long-term load growth," *Applied Energy*, vol. 364, p. 123127, 2024.

21. F. Arraño-Vargas, Z. Shen, S. Jiang, J. Fletcher, and G. Konstantinou,

"Challenges and mitigation measures in power systems with high share of renewables—the Australian experience," *Energies*, vol. 15, no. 2, p. 429, 2022.

22. M. Ghahramani, M. Nazari-Heris, K. Zare, and B. Mohammadi-Ivatloo, "A two-point estimate approach for energy management of multi-carrier energy systems incorporating demand response programs," *Energy*, vol. 249, p. 123671, 2022.

23. M. Ghahramani, M. Nazari-Heris, K. Zare, and B. Mohammadi-Ivatloo, "Energy and reserve management of a smart distribution system by incorporating responsive-loads/battery/wind turbines considering uncertain parameters," *Energy*, vol. 183, pp. 205-219, 2019.

24. S. Vöth, A. Nikolaev, and A. Kychkin, "Demand response service architecture for power system of Ukrainian mining enterprise," in 2021 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM), 2021: IEEE, pp. 63-67.

25. A. van Tonder, M. Kleingeld, and J. Marais, "Investigating demand response potential in a mining group," in 2013 Proceedings of the 10th Industrial and Commercial Use of Energy Conference, 2013: IEEE, pp. 1-5.

26. L. H. Xavier, M. Ottoni, and L. P. P. Abreu, "A comprehensive review of urban mining and the value recovery from e-waste materials," *Resources, Conservation and Recycling*, vol. 190, p. 106840, 2023.

ДОДАТОК А ПРОТОКОЛ ПЕРЕВІРКИ НАВЧАЛЬНОЇ (КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ) РОБОТИ

Назва роботи: «Врахування невизначеності під час інтегрування відновлюваних джерел енергії у локальні електричні системи»

Тип роботи: Магістерська кваліфікаційна робота
(кваліфікаційна робота, курсовий проект (робота), реферат, аналітичний огляд, інше (зазначити))

Підрозділ: Кафедра електричних станцій та систем
(кафедра, факультет (інститут), навчальна група)

Керівник: к.т.н., доцент кафедри ЕСС Кулик В. В.
(прізвище, ініціали, посада)

Показники звіту подібності

StrikePlagiarism	
Оригінальність	99
Загальна схожість	1

Аналіз звіту подібності (відмітити потрібне)

- ☐ Запозичення, виявлені у роботі, оформлені коректно і не містять ознак плагіату.
- ☐ Виявлені у роботі запозичення не мають ознак плагіату, але їх надмірна кількість викликає сумніви щодо цінності роботи і відсутності самостійності її автора. Роботу направити на доопрацювання.
- ☐ Виявлені у роботі запозичення є недобросовісними і мають ознаки плагіату та/або в ній містяться навмисні спотворення тексту, що вказують на спроби приховування недобросовісних запозичень.

Заявляю, що ознайомлений (-на) з повним звітом подібності, який був згенерований Системою щодо роботи

Автор Маціпура С.М.
(підпис) (прізвище, ініціали)

Опис прийнятого рішення

Робота допущена до захисту
Особа, відповідальна за перевірку Вишневський С.Я
(підпис) (прізвище, ініціали)

Експерт _____
(за потреби) (підпис) (прізвище, ініціали, посада)

Додаток Б
(обов'язковий)

ГРАФІЧНА ЧАСТИНА
ВРАХУВАННЯ НЕВИЗНАЧЕНОСТІ ПІД ЧАС ІНТЕГРУВАННЯ
ВІДНОВЛЮВАНИХ ДЖЕРЕЛ ЕНЕРГІЇ У ЛОКАЛЬНІ ЕЛЕКТРИЧНІ
СИСТЕМИ

Врахування невизначеності під час інтегрування відновлюваних джерел енергії у локальні електричні системи

Бакалаврська робота

Виконав: [Маціпура С. М.]

Керівник: [Кулик В. В]

Вінниця, 2025



Мета: врахування невизначеності під час інтегрування відновлюваних джерел енергії у локальні електричні системи.

Задачі: дослідити попит та внесок відновлюваної енергетики, розрахувати усі варіанти ризиків, які можуть застосовуватися при інтегруванні відновлюваних джерел енергії у локальні електричні системи

Локальна Електроенергетична Система (ЛЕЕС)

ЛЕЕС – це самостійний комплекс з виробництва, розподілу та споживання енергії для обмеженої території.



Таблиця 1. Попит та внесок відновлюваної енергетики

Година	Електрика (кВт)	Потреба в теплі (кВт)	Потреба в воді (м³)	Сонячне (кВт/м²)	Швидкість вітру (м/с)
1	600	150	100	0	6.0
2	550	145	95	0	5.5
3	500	140	90	0	6.8
4	450	135	85	0	4.5
5	400	130	80	0	5.0
6	1200	250	300	300	7.8
7	1500	300	350	400	6.7
8	1600	450	400	500	5.5
9	1800	500	450	600	6.2
10	2000	550	500	700	6.0
11	2200	600	550	800	6.0
12	2400	620	600	850	5.9
13	2500	650	650	800	5.5
14	2600	670	700	700	5.7
15	2700	690	730	600	5.0
16	2800	700	740	500	5.5
17	2750	670	730	400	6.5
18	2700	660	720	300	6.5
19	2600	620	710	200	7.0
20	2500	600	700	100	7.5
21	2000	580	600	0	6.5
22	1500	550	500	0	6.5
23	1000	500	400	0	7.5
24	800	450	350	0	8.0

Таблиця 3. Невизначеність та вхідні дані для сценаріїв

Сценарій	Невизначеність	VOLL для електроенергії	VOLL для тепла	VOLL для води
Не схильні до ризику	25%			
Нейтральний ризик	20%	75 USD/кВт-год	75 USD/кВт-год	150 USD/м³
У пошуках ризику	15%			

Виробництво електроенергії в прикладі, що не схильний до ризику.

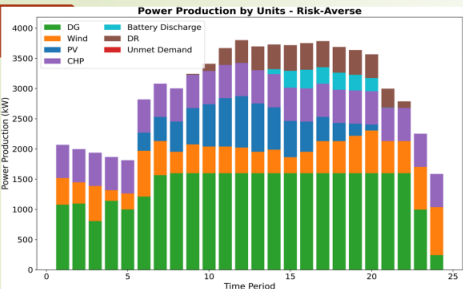


Рисунок 3.

Виробництво теплової енергії, що не пов'язаний з ризиком

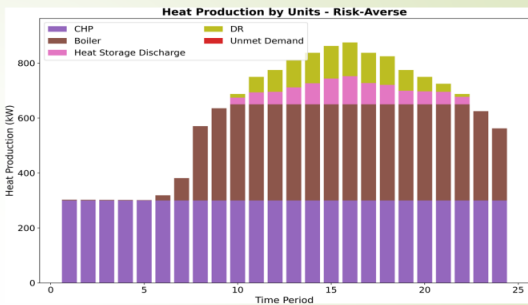


Рисунок 4

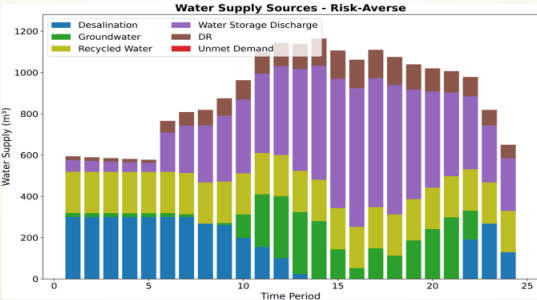


Рисунок 5. Джерела водопостачання в прикладі, що не схильний до ризику.

Таблиця 7. Аналіз витрат за різними сценаріями

Тип витрат	Відмова від ризику (USD)	Безризиковий (USD)	Пошук ризиків (USD)
Загальна вартість	54,014.71	49,633.64	45,340.80
Операційні витрати	44,103.65	41,172.54	38,401.14
Логістичні витрати	1,195.08	1,176.33	1,148.49
Вартість штрафу	0.0	0.0	0.0
Вартість ДР	8,715.98	7,284.77	5,791.17

Рисунок 12. Порівняння акумуляторних батарей у тематичних дослідженнях.

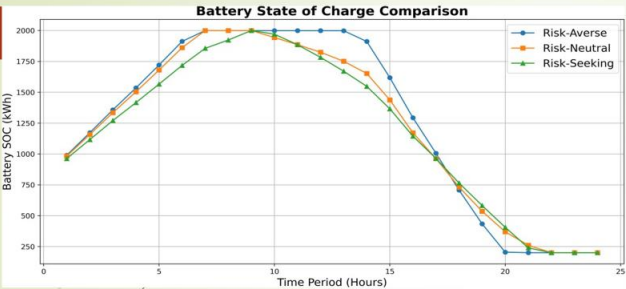
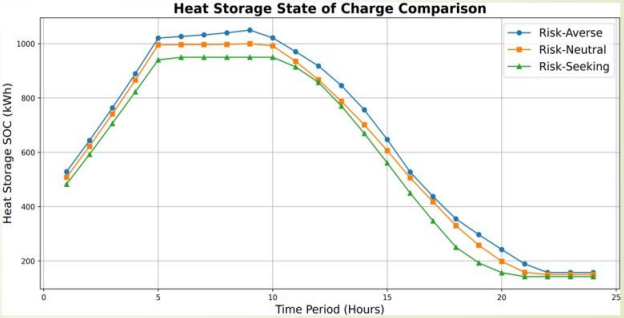


Рисунок 13. Порівняння систем акумулювання тепла у конкретних прикладах.



Таблиця 4.3 – Вимоги до освітлення приміщень виробничих підприємств

Харак-ка зорової роботи	Найменший або еквівалентний розмір об'єкта розрізнення, мм	Розряд зорової роботи	Під-розряд зорової роботи	Контраст об'єкта з фоном	Характеристика фону	Штучне при системі комбінованого освітлення		Природне Ен пр	Сумісне Е сум
						всього	у т. ч. від загального		
Середньої точності	Від 0,5 до 1,0 включно	IV	в	малий середній великий	світлий середній темний	400	200	4	2,4

Таблиця 4.6 – Мінімальні межі вогнестійкості будівельних конструкцій та максимальні межі поширення вогню по них

Ступінь вогнестійкості і будинків	Мінімальні межі вогнестійкості будівельних конструкцій (у хвилинах) і максимальні межі поширення вогню по них (см)								
	стіни				коло-ни	сходові площад-ки, костури, сходи, балки, марші сходових кліток	пере-криття між по-верхові (у т.ч. горищні та над підва-лами	елементи суміщених покриттів	
	несучі та сходових кліток	само-несучі	зовнішні не-несучі	внутрішні не-несучі (перегородки				плити, настінні, прого-ни	балки, ферми, арки, рами
II	REI 120 M0	REI 60 M0	E 15 M0	EI 15 M0	R 120 M0	R 60 M0	REI 45 M0	RE 15 M0	R 30 M0



Висновки: було успішно враховано невизначеності під час інтегрування відновлюваних джерел енергії у локальні електричні системи. В результаті використані моделі невизначеності були ефективними для відображення впливу невизначеностей у заданих межах. Досягнуто декілька варіантів остаточного результату, для кожного виду невизначеності та ретельно проаналізовано кожен з них.