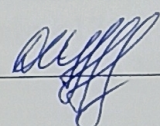


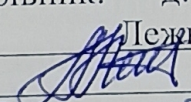
Вінницький національний технічний університет
Факультет електроенергетики та електромеханіки
Кафедра електричних станцій та систем

МАГІСТЕРСЬКА КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

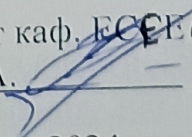
на тему:

«Аналіз методів та способів компенсації нестабільності генерування
відновлюваних джерел енергії»

Виконав: студент 2-го курсу, групи 2ЕСМ-23м
спеціальності 141 – «Електроенергетика,
електротехніка та електромеханіка»
освітня програма «Електричні системи і
мережі»,
Щербатий Д. В. 

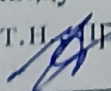
Керівник: д.т.н професор каф. ЕСС.
Пешніок П.Д. 

«06» 12 2024 р.

Опонент: к.т.н., доцент каф. ЕССЕМ
Шуліс Ю. А. 

(прізвище та ініціали)

«09» 12 2024 р.

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

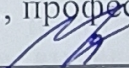
«06» 12 2024 р.

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

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри ЕСС

д.т.н., професор Комар В. О.


«17» 09

2024 р.

ЗАВДАННЯ НА МАГІСТЕРСЬКУ ДИПЛОМНУ РОБОТУ СТУДЕНТУ

Щербатому Данилу Вікторовичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи «Аналіз методів і способів компенсації нестабільності генерування відновлюваних джерел енергії»

Керівник роботи д.т.н., проф. Лежнюк П.Д.

(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджена наказом вищого навчального закладу від «17» 09 2024 р., № 310.

2. Термін подання студентом роботи 28 листопада 2024 року

3. Вихідні дані до роботи:

1. 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.

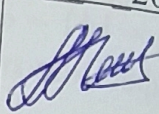
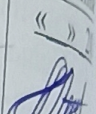
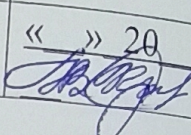
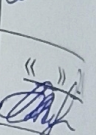
2. Кудря С.О. Нетрадиційні та відновлювані джерела енергії. К.:
НТУУ «КПІ», 2012. 492 с.

3. Енергоефективність та відновлювані джерела енергії. Під заг. ред.
Шидловського А.К. Київ: Українські енциклопедичні знання, 2007. 559 с.

4. Зміст текстової частини Вступ. 1. Потреба компенсації генерування
негарантованих джерел енергії. 2. Переваги та практичне застосування методу
критеріального програмування у задачах відновлювальних джерел енергії. 3.
Критеріальний метод у забезпеченні балансу енергії в системах з вде. 4. Заходи
забезпечення надійної та безпечної експлуатації електроустановок. Висновки.
Список використаних джерел.

5. Перелік ілюстративного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень):
Класифікація задач прогнозування генерування електроенергії В/ДЕ в залежності
від використання прогнозованих даних; структурна схема індукційного
генератора зі сталою швидкістю; вплив вітрової енергії на енергетичну систему,
що спричиняє витрати на інтеграцію.

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	виконав
Спеціальна частина	Керівник роботи Лежнюк П.Д., д.т.н., проф., професор кафедри ЕСС	« » 20 	« » 20 
Економічна частина	Остра Н. В. к.т.н., доцент каф. ЕСС	« » 20 	« » 20 

7. Дата видачі завдання «17» 09 2024 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва та зміст етапів	Термін виконання етапів роботи	
		початок	кінець
1	Формування та затвердження теми МКР	17.09.24	17.09.24
2	Вступ. Огляд літературних джерел	21.09.24	24.09.24
3	1 Потреба компенсації генерування негарантованих джерел енергії	24.09.24	29.09.24
4	2 Переваги та практичне застосування методу критеріального програмування у задачах відновлювальних джерел енергії	30.09.24	10.10.24
5	3 Критеріальний метод у забезпеченні балансу енергії в системах з вде.	11.10.24	28.10.24
6	4 Заходи забезпечення надійної та безпечної експлуатації електроустановок	29.10.24	05.11.24
7	Формування висновків по роботі	06.11.24	12.11.24
8	Оформлення пояснювальної записки	13.11.24	21.11.24
9	Виконання графічної частини та оформлення презентації	22.11.24	27.11.24
10	Перевірка МКР на плагіат. Попередній захист МКР	28.11.24	01.12.24
11	Рецензування МКР	01.12.24	04.12.24
	Захист МКР	За графіком	

Студент

Керівник роботи

(підпис)

(підпис)

Д. В. Шеро
(ініціали та прізвище)

П. Д. Лежнюк
(ініціали та прізвище)

Анотація

Щербатий Д. В. Аналіз способів і засобів компенсації нестабільності генерування відновлювальних джерел енергії. Магістерська кваліфікаційна робота – Вінниця: ВНТУ, 2024 – 112 с., таблиць: 01, ілюстрацій 26.

Дана робота присвячена аналізу та вирішенню проблеми компенсації нестабільності генерування електроенергії з відновлювальних джерел енергії (ВДЕ), таких як сонячні, вітрові, геотермальні, біоенергетичні та гідроелектростанції. Розглянуто використання накопичувачів енергії для підвищення стабільності генерування та ефективність застосування критеріальних методів для оптимізації витрат на резервування. Зокрема, обговорюється компенсація коливань генерації за допомогою хімічних накопичувачів, біогазових установок і їх комбіноване використання. Окрім цього, у роботі розглядаються заходи забезпечення надійної та безпечної експлуатації електричних установок, зокрема вітрогенераторів.

Ключові слова: відновлювальні джерела енергії, нестабільність генерування, підвищення надійності, нетрадиційні джерела енергії, оптимізація витрат на резервування, критеріальні методи, стабільність генерування.

Abstract

Shcherbatyi D.V. Methods and means of compensating generation instability of renewable energy sources. Master's thesis – Vinnytsia National Technical University, 2024 - 112 p., tables: 01, drawings: 26.

The paper is dedicated to analyzing and solving the problem of compensating for the instability of electricity generation from renewable energy sources (RES), such as solar, wind, geothermal, bioenergy, and hydroelectric power plants. The use of energy storage systems to enhance generation stability and the effectiveness of applying criterion-based methods for optimizing reserve costs are discussed. In particular, compensation for generation fluctuations using chemical energy storage, biogas plants, and their combined use is considered. Additionally, the work addresses measures for ensuring reliable and safe operation of electrical installations, including wind turbines.

Keywords: renewable energy sources, generation instability, reliability improvement, unconventional energy sources, optimization of reserve costs, criterion-based methods, generation stability.

ЗМІСТ

ВСТУП	8
1 ПОТРЕБА КОМПЕНСАЦІЇ ГЕНЕРУВАННЯ НЕГАРАНТОВАНИХ ДЖЕРЕЛ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ	11
1.1 Проблематика використання негарантованих джерел електроенергії.....	11
1.1.1 Нестабільність генерування СЕС.....	14
1.1.2 Нестабільність генерування ВЕС.....	24
1.1.3 Геотермальна енергетика.....	38
1.1.4 Біоенергетика	39
1.1.5 Гідроенергетика.....	40
1.2 Використання накопичувачів енергії для підвищення стабільності генерування негарантованих джерел енергії	42
1.3 Висновки	47
2 ПЕРЕВАГИ ТА ПРАКТИЧНЕ ЗАСТОСУВАННЯ МЕТОДУ КРИТЕРІАЛЬНОГО ПРОГРАМУВАННЯ У ЗАДАЧАХ ВІДНОВЛЮВАЛЬНИХ ДЖЕРЕЛ ЕНЕРГІЇ	49
2.1 Використання методу у задачах енергетики	50
2.1.1 Екологічні критерії.....	50
2.1.2 Економічні критерії.....	51
2.1.3 Технічні критерії	51
2.2 Формалізація задачі.....	52
2.2.1 Приклад застосування.....	52
2.2.2 Алгоритм реалізації.....	53
2.3 Переваги методу	54
2.4 Висновок	54
3 КРИТЕРІАЛЬНИЙ МЕТОД У ЗАБЕЗПЕЧЕННІ БАЛАНСУ ЕНЕРГІЇ В СИСТЕМАХ З ВДЕ	56
3.1 Системний підхід до компенсації коливань генерації ВДЕ	56
3.2 Критеріальна модель питомих витрат на резервування при використанні хімічних накопичувачів	62

3.3 Критеріальна модель питомих витрат на резервування за сценарієм при використанні хімічних накопичувачів і біогазових установок	69
3.4 Практичне застосування способі компенсації нестабільності генерування генерованої ВДЕ електроенергії	77
3.4.1 Визначення допустимих відхилень параметрів.....	77
3.4.2 Математичні моделі для визначення допусків	82
3.4.3 Використання методу рівних впливів для визначення допусків	84
3.4.4 Розподіл допусків із використанням критеріальних моделей	89
3.5 Висновки	98
4 ЗАХОДИ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ НАДІЙНОЇ ТА БЕЗПЕЧНОЇ ЕКСПЛУАТАЦІЇ ЕЛЕКТРОУСТАНОВОК	100
4.1 Завдання розділу.....	100
4.2 Умови праці, під час виконання монтажних робіт вітрогенераторів.....	101
4.3 Розробка організаційно-технічних рішень з охорони праці при електричному монтажі вітрогенераторів	102
4.3 Розрахунок параметрів заземлючого пристрою ВЕС	104
4.4 Протипожежний захист приміщення релейного захисту та автоматики.....	108
4.5 Висновки	110
ВИСНОВОК.....	112
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	114
ДОДАТОК А.....	118
ДОДАТОК Б	119
ДОДАТОК В	122

ВСТУП

Актуальність теми: Необхідність інтеграції енергетичної, екологічної та соціально-економічної політики виникла через зростання навантаження на довкілля, спричинене традиційною енергетикою, промисловістю, транспортом та антропогенною діяльністю.

Використання відновлюваних джерел енергії (ВДЕ) у конкретних енергосистемах (ЕС) залежить від наступних факторів:

- Рівень доступності традиційних та відновлюваних джерел енергії з урахуванням їх потенціалу в регіоні (районі, місті тощо).
- Кліматичні та метеорологічні умови.
- Структура систем постачання та використання енергії.
- Вимоги до якості електричної та теплової енергії.
- Тип та параметри навантаження.
- Вимоги до графіка постачання енергії на годинній основі.
- Економічні та екологічні фактори.

Відновлювальні джерела енергії (ВДЕ) мають наступні переваги порівняно з традиційними:

- Вони практично нескінченні, оскільки постійно відновлюються з первинних джерел.
- Процес виробітку електричної енергії супроводжується незначним – порівняно з традиційними джерелами електроенергії – рівнем забруднення навколишнього середовища.
- Використання відновлювальних джерел енергії не вимагає видобутку, переробки та транспортування первинних енергоносіїв, таких як: вугілля, нафта або газ.
- Вони не потребують великих обсягів води для охолодження в теплових установках, а також збирання та транспортування відходів виробництва, а саме: попіл, продукти розпаду та згоряння.

- Менша кількість персоналу для обслуговування агрегатів виробництва електроенергії.
- Відновлювальні джерела енергії можуть бути розташовані у безпосередній близькості до місць споживання, що усуває необхідність у довготривалому транспортуванні енергії на великі відстані та зменшує рівень втрат на передачу.

Проте, впровадження відновлюваних джерел енергії в енергосистему затримується через значні недоліки. Основні проблеми полягають у наступному:

- Низька об'ємна густина енергії.
- Високий рівень залежності енергетичного потенціалу ВДЕ від часу, погодних умов та місця використання
- Значні інженерно-технічні проблеми у розробці ефективних технологій отримання та зберігання енергії, що призводить до високих витрат на виробництво енергії.

Незважаючи на такі цінні характеристики ВДЕ, як їх відновлюваність і екологічна «чистота», їх використання обмежується дуже низькою густиною потоку енергії на одиницю площі, що призводить до необхідності залучати великі території для отримання достатньої кількості енергії для практичного її застосування. Наприклад, для сонячних, вітрових і геотермальних установок густина енергії становить кілька сотень ват на квадратний метр, тоді як сучасні котли та ядерні реактори досягають в тисячі разів більших значень даного параметра. Тому нетрадиційні джерела електроенергії мають значно більші розміри та вимагають значно більше матеріалів на будівництво та обслуговування у порівнянні зі звичайними тепловими та атомними електростанціями.

Одним із факторів, що обмежує використання відновлюваних джерел енергії, є недостатня стабільність енергетичних потоків, яка проявляється у періодичності та змінності енергетичного потенціалу залежно від часу, метеорологічних умов та місця розташування станції ВДЕ. Це викликало значні труднощі в багатьох випадках їх використання та не задовольняло сучасні

вимоги щодо енергопостачання споживачів. Крім того, при широкому впровадженні обладнання для відновлюваної енергетики виникає проблема створення регульовальних потужностей на основі традиційних енергосистем, які забезпечували б стабільне енергопостачання в періоди, коли відновлювана енергія не доступна. Беззаперечно, у деяких випадках така потреба є необхідною, але в даний час у сфері відновлюваної енергетики існує широкий спектр технічних засобів та методів для вирішення цієї проблеми, включаючи використання акумуляторів електричної та теплової енергії.

Таким чином питання компенсації нестабільності відновлювальних джерел енергії є вкрай актуальною проблемою, яка потребує якнайскорішого вирішення для забезпечення подальшого розвитку електроенергетичного сектору промисловості, зменшення забруднення навколишнього середовища та гарантування майбутнього існування людства без дефіциту електроенергії.

1 ПОТРЕБА КОМПЕНСАЦІЇ ГЕНЕРУВАННЯ НЕГАРАНТОВАНИХ ДЖЕРЕЛ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ

1.1 Проблематика використання негарантованих джерел електроенергії

В умовах інтенсивного розвитку електроенергетики, стабільність електроенергетичної мережі стає ключовим фактором для досягнення стійкого та електрифікованого майбутнього. Оскільки весь світ переорієнтовується на електрифікацію задля досягнення декарбонізаційних цілей, навантаження на електричні мережі досягло небувалого рівня. Цей перехід, зумовлений впровадженням передових технологій та зростанням попиту на накопичення енергії, створює передумови для оцінки стійкості електроінфраструктури. Значення електричної мережі в цьому контексті неможливо недооцінити; вона є центральною ланкою сучасної енергетичної системи, забезпечуючи транспортування електроенергії від джерел генерації до кінцевих споживачів. Водночас цей критично важливий компонент стикається з низкою викликів, серед яких зношеність інфраструктури, інтеграція відновлюваних джерел енергії та складнощі, пов'язані з нестабільністю попиту. Вирішення цих проблем є нагальним завданням для забезпечення надійного та ефективного енергопостачання у майбутні десятиліття.

Більша частина електричних мереж України була побудована в 1960-х і 1980-х роках, що тепер залишає інфраструктуру неспроможною повністю задовольняти сучасні потреби в електроенергії. Це стосується також інтеграції відновлюваних джерел енергії та зростаючих потреб електрифікації будівель і транспорту. Значна частина компонентів мережі, таких як лінії електропередачі, віком уже понад 25 років і наближаються до кінця свого типового життєвого циклу, що становить 50–80 років. Старіння інфраструктури не лише спричиняє збільшення кількості відключень електроенергії, але й підвищує вразливість до кібератак та надзвичайних ситуацій у громадах через збої в мережі. Американське товариство цивільних інженерів оцінило інфраструктуру США на

рівні С-, що вказує на критичну необхідність модернізації для забезпечення сучасних електричних навантажень та екологічних викликів.

Інтеграція відновлюваних джерел енергії, таких як вітрові та сонячні установки, в електроенергетичну мережу супроводжується значними технічними викликами через притаманні їм мінливість і періодичність. На відміну від традиційних джерел енергії, потужність виробництва відновлюваних ресурсів характеризується непостійністю і передбачуваними коливаннями. Ці коливання обумовлені природними циклами, такими як добові зміни та сезонні фактори, тоді як непостійність може бути пов'язана з непередбачуваними погодними умовами, наприклад, хмарністю або коливаннями швидкості вітру.

Так, у Німеччині, незважаючи на значні встановлені потужності вітрової та сонячної генерації, фактичне виробництво енергії є лише часткою від їхнього потенціалу: вітрові електростанції забезпечують лише 16,3% від встановленої потужності, а сонячні — 9,9% [1]. Подібна мінливість створює додаткові складнощі в управлінні постачанням електроенергії, що вимагає впровадження сучасних методів прогнозування, динамічних стратегій керування навантаженням та гнучкості роботи мережі для підтримки стабільного балансу і запобігання перебоєм у системі.

Для успішної інтеграції відновлюваних джерел енергії в електроенергетичну мережу необхідно вирішити низку технічних та експлуатаційних проблем. Серед основних завдань — підвищення гнучкості мережі для ефективного управління раптовими змінами генерації, характерними для відновлюваних джерел. Це вимагає значних інновацій у мережевій інфраструктурі, включаючи впровадження «розумних» мереж із використанням штучного інтелекту для точного прогнозування і керування енергетичними потоками.

Координація операцій між різними частинами мережі є ключовою для зниження наслідків мінливості відновлюваних джерел. Завдяки обміну такими ресурсами, як резервні потужності, та узгодженню графіків навантаження оператори можуть підвищити стійкість і надійність електропостачання.

Проведення досліджень інтеграції відновлюваної енергії дозволяє виявити специфічні потреби й можливі обмеження високовідновлюваного майбутнього, формуючи основу для інвестиційних і операційних стратегій.

Також необхідна модернізація технологій підключення відновлюваних джерел до мережі. Сучасні обмеження пропускної здатності ліній передачі та технічні труднощі перетворення постійного струму, що виробляється відновлюваними джерелами, на змінний струм для розподілу залишаються істотними бар'єрами. Інноваційні рішення в галузі інверторів із формуванням мережі та систем управління мають критичне значення для забезпечення надійного підключення та ефективного розподілу енергії.

Додатково, географічний розрив між зонами генерації відновлюваної енергії та регіонами високого споживання вимагає вдосконалення мереж передачі енергії. Розробка надійних рішень для зберігання енергії, зокрема акумуляторних систем та гідроакумуляуючих станцій, має вирішальне значення для забезпечення балансу в періоди низької генерації.

Вирішення цих викликів дозволить операторам мереж забезпечити стабільність електропостачання, сприяючи глобальному переходу до чистої та надійної електроенергії.

На рис. 1.1 показано класифікацію задач прогнозування ВДЕ в залежності від використання прогнозованих даних

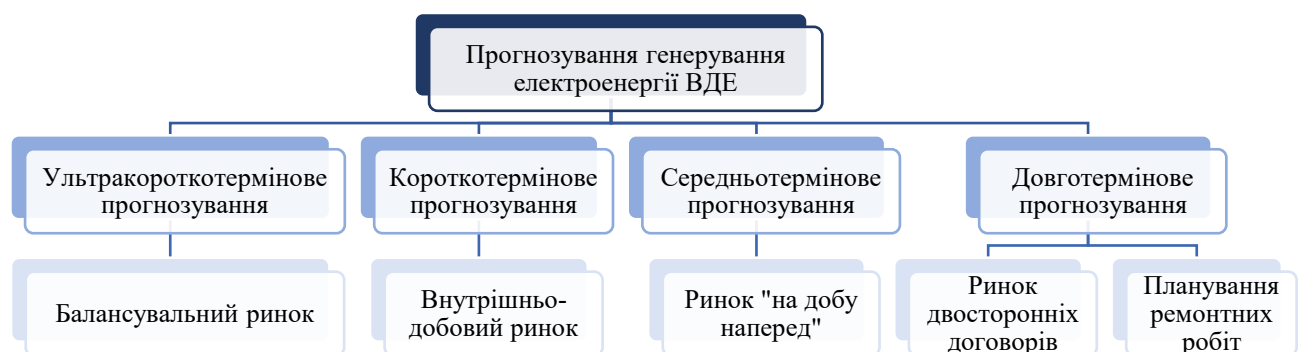


Рисунок 1.1 — Класифікація задач прогнозування генерування електроенергії ВДЕ в залежності від використання прогнозованих даних

1.1.1 Нестабільність генерування СЕС

Для зрілого сектору, такого як сонячна енергетика, майже двократне зростання темпів введення в експлуатацію потужностей протягом одного року є подією, що виходить за рамки стандартних прогнозів галузевих аналітиків. Проте у 2023 році цей феномен став реальністю. Глобальна енергетична система отримала 447 ГВт нових сонячних фотовольтаїчних потужностей, що на 87% перевищує показник 2022 року. Цей винятковий темп зростання є найвищим з 2010 року, коли світовий ринок сонячної енергетики становив лише 4% від сучасного рівня [2].

На рисунку 1.2 приведено кругову діаграму встановленої потужності генерації ВДЕ, доданої у 2023-му році.

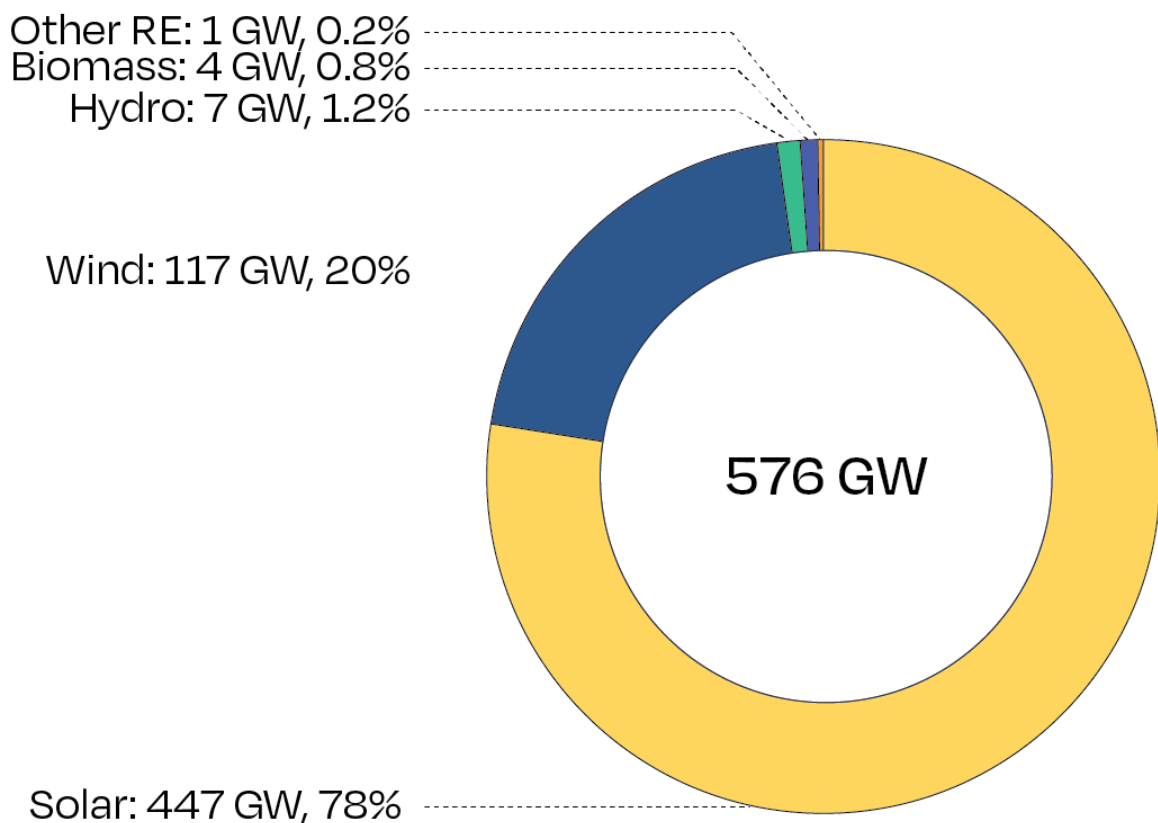


Рисунок 1.2 — Чиста потужність виробництва відновлюваної енергії, встановлена у 2023 році [2].

Обсяг у 447 ГВт нових встановлених потужностей сонячної енергетики став безпрецедентним рекордом, значно перевищивши всі попередні аналітичні

прогнози, та продемонструвавши вражаючий темп зростання у 87% (див. рис. 1.3). Для порівняння, у 2022 році було додано 239 ГВт нових потужностей, що відповідає річному зростанню на рівні 46%.

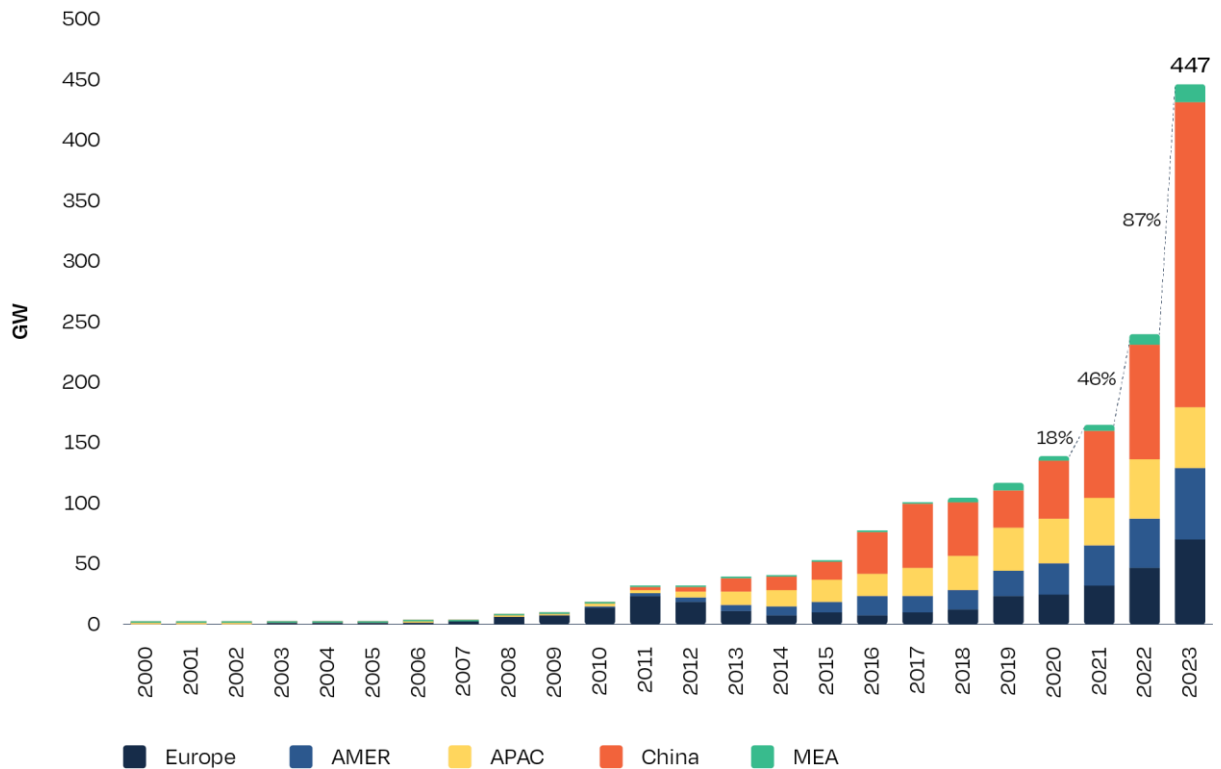


Рисунок 1.3 — Річний обсяг встановлених потужностей сонячної фотовольтаїки, 2000–2023 роки [2]

Значне зростання встановлених сонячних потужностей у світі пояснюється кількома важливими чинниками. По-перше, суттєве розширення можливостей виробництва фотовольтаїчних панелей на глобальному рівні значно покращило доступність сонячних модулів після перебоїв у ланцюгах постачання, спричинених пандемією. Надлишкові виробничі потужності призвели до різкого зниження цін на компоненти у 2023 році, при цьому вартість модулів зменшилася приблизно на 50%.

Крім того, тривалі наслідки глобальної енергетичної кризи 2022 року продовжували стимулювати попит у багатьох регіонах. Уряди, підприємства та приватні особи все частіше зверталися до сонячної енергетики як до надійної та економічно вигідної альтернативи стрімкому зростанню цін на енергію.

Паралельно з цим електрифікація секторів опалення та транспорту набирала значного темпу. Збільшена доступність продукції та монтажних послуг за більш доступними цінами дозволила реалізувати багато замовлень, зроблених у 2021 і 2022 роках, саме у 2023 році.

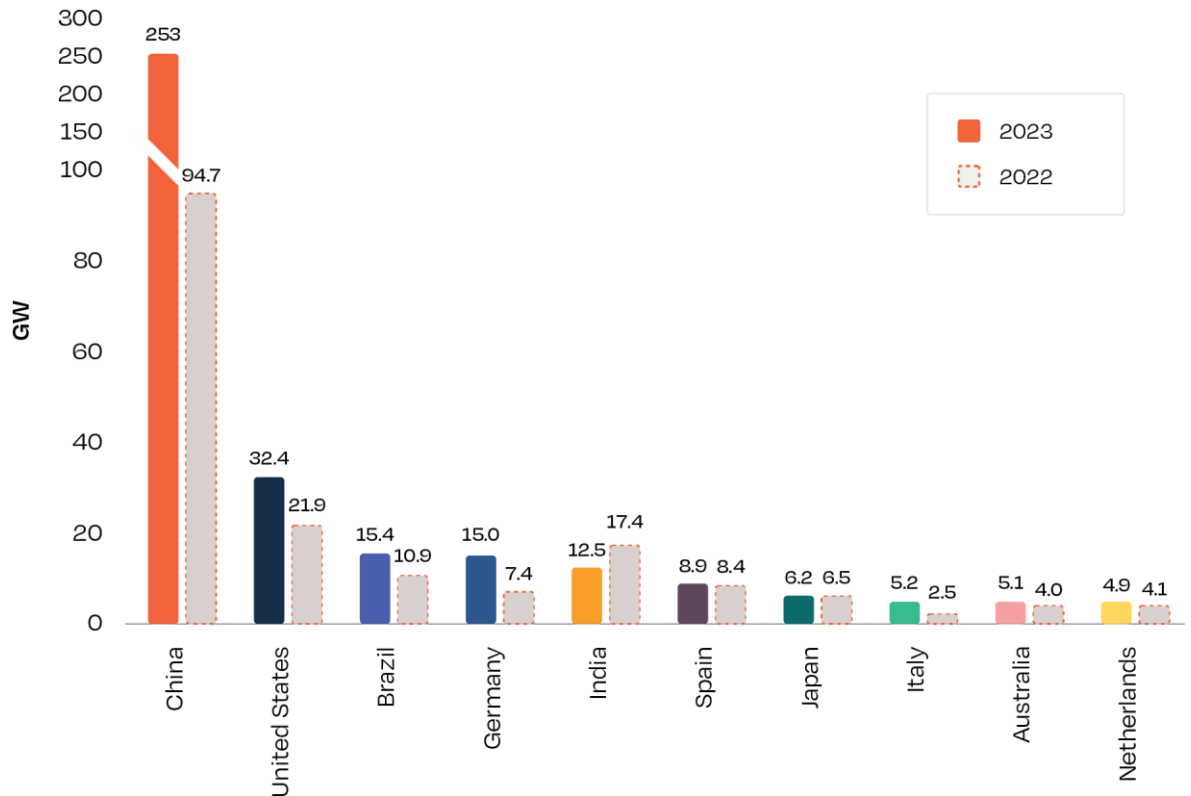


Рисунок 1.4 — 10 наймасштабніших ринків сонячної електроенергії станом на 2024 рік

Перспективи для сонячної енергетики цього року та в майбутньому виглядають багатообіцяючими, хоча сектор продовжуватиме стикатися з певними викликами. На стороні пропозиції виробництво фотогальванічних модулів залишається під тиском через рекордно низькі ціни та надлишкові виробничі потужності. Тривалість цього періоду залежатиме від темпів консолідації у секторі. З іншого боку, попит отримає додатковий імпульс від зниження цін, яке продовжуватиме відігравати ключову роль у складному макроекономічному контексті.

Уряди, як очікується, зосередять ще більше уваги на розв'язанні кліматичної кризи, тоді як енергетична безпека залишатиметься вагомим стимулом для збільшення інвестицій у сонячну енергетику на тлі геополітичної фрагментації. Завдяки подальшому зниженню витрат і численним перевагам сонячної енергетики, прогнозований обсяг нових встановлених потужностей на 2024 рік збільшено до 544 ГВт, що базується на очікуваному зростанні на 22% порівняно з попереднім роком. У довгостроковій перспективі прогнозується, що до 2028 року щорічний ринок сягне 876 ГВт.

На позитивний настрій галузі вплинула інформація із останнього звіту *IEA World Energy Investment 2024*, згідно з яким інвестиції у сонячну енергетику перевищили сукупні інвестиції у всі інші технології генерації. Проте глобальна нерівність у розподілі інвестицій залишається серйозною проблемою: дві третини населення світу, які проживають у країнах, що розвиваються (окрім Китаю), отримали лише 15% від загального обсягу інвестицій у відновлювану енергетику.

Враховуючи вищевказане та темпи розширення частки сонячних електростанцій у світовій електросистемі, розвиток технологій для компенсування нестабільності сонячної енергетики є критично важливим, оскільки її генерація залежить від природних умов і схильна до значних коливань. Це може призводити до дисбалансів у енергосистемі, особливо зі зростанням частки сонячної енергії у світовому та локальному енергетичному балансі. Інвестиції у системи акумуляування енергії, інтелектуальні мережі та алгоритми прогнозування дозволять підвищити надійність і стабільність енергопостачання, забезпечити ефективну інтеграцію відновлюваних джерел енергії та сприяти сталому розвитку енергетичного сектору, особливо в умовах кліматичної кризи та необхідності енергетичної безпеки.

Українська енергосистема, яка значною мірою залежить від фотоелектричних станцій, через їх залежність від погодних умов стикається зі значними викликами щодо інтеграції відновлюваних джерел енергії (ВДЕ).

Відсутність гнучкості та обмежена ємність для накопичення енергії ускладнюють пристосування до нестабільного характеру ВДЕ. Попри те, що Україна ставить за мету досягнення 20% частки ВДЕ до 2035 року, виконання зобов'язань за Паризькою угодою може вимагати перевищення цього показника. [3]

Тому виникає нагальна потреба у розвитку нових генеруючих потужностей із високою маневреністю, щоб забезпечити стабільність мережі за умов зростання частки негарантованих ВДЕ.

Для підтримання надійності балансування розглядаються кілька технологічних рішень [4]:

1. Високоманеврова газова генерація: використання газових турбін або комбінованих циклічних електростанцій для швидкого реагування.
2. Швидкозапускова газова генерація: забезпечення оперативного введення потужностей у періоди пікових навантажень.
3. Маневрові електростанції: забезпечення гнучкості та адаптивності до коливань у генерації ВДЕ.
4. Системи накопичення електричної енергії: стабілізація частоти мережі шляхом зберігання надлишкової енергії.
5. Системи накопичення теплової енергії: використання споживачів як регуляторів через акумулювання теплової енергії.
6. Системи "power-to-power": перенесення надлишкової енергії з періодів її надлишку на періоди дефіциту.

Хоча існуючі моделі прогнозування дозволяють передбачати виробництво та споживання, їм бракує точності для повного контролю. Процес балансування на ринку балансувальних потужностей включає визначення резервних потреб, закупівлю балансувальних потужностей та придбання балансувальної енергії. Однак забезпечення достатніх балансувальних резервів залишається гострою проблемою, особливо на початкових етапах роботи оптового ринку з установленними обмеженнями.

Можливий дефіцит інвесторських реакцій на зростання попиту на нові потужності створює ризик несвоєчасного впровадження необхідних резервів для балансування.

Під час інтеграції відновлюваних джерел енергії (ВДЕ) необхідно підтримувати резерв балансування системи, який забезпечується не лише гідроенергетичними станціями, але й тепловими електростанціями (ТЕС). У дослідженнях [5], [6] наголошується, що за умов дефіциту маневрових потужностей зменшення навантаження енергосистеми часто здійснюється за рахунок вугільних ТЕС. Робота таких станцій у позапроектних умовах, зокрема позапланові пуски та зупинки, прискорює зношування обладнання, збільшує витрати палива та скорочує термін служби агрегатів. Це призводить до додаткових витрат на ремонт і технічне обслуговування. Наприклад, запуск одного блоку потужністю 300 МВт потребує близько 70 тонн мазуту, а витрати палива на виробництво 1 кВт·год електроенергії можуть перевищувати норму на 10–30%.

Згідно з даними Національної комісії, що здійснює державне регулювання у сферах енергетики та комунальних послуг (НКРЕКП), за 2018 рік більшість блоків ТЕС потребують заміни або модернізації, оскільки вони вичерпали або наближаються до закінчення свого нормативного ресурсу. Зокрема, із 75 генеруючих блоків ТЕС 68 блоків (16 962 МВт або 78,7%) вже експлуатуються понад свій розрахунковий термін служби, 2 блоки (600 МВт або 2,8%) перевищили нормативний термін експлуатації, а 5 блоків (4 000 МВт або 18,6%) працюють понад свій проектний ресурс [6]. Ситуація лише погіршується через обстріли росією енергетичної інфраструктури України.

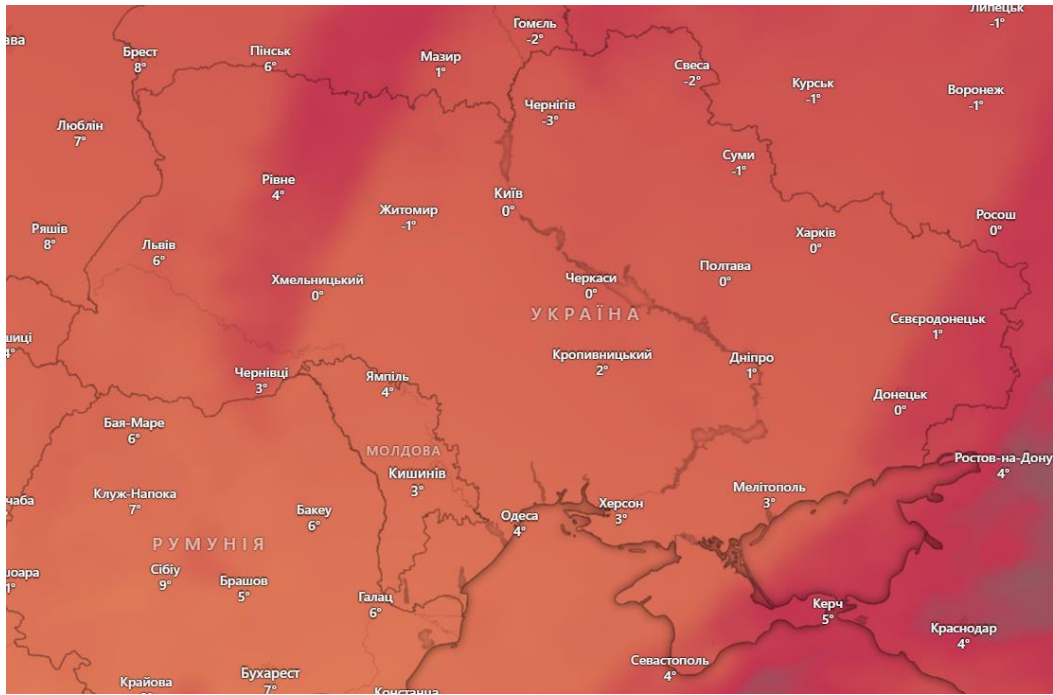
Таким чином, електростанції повинні повністю покривати навантаження, а також втрати, що виникають під час передачі електроенергії. Це означає, що сумарна генеруюча потужність системи має відповідати величині навантаження разом із потужністю, необхідною для балансування. Додатково потрібно враховувати надійність балансування та якість електроенергії для забезпечення стабільної роботи енергосистеми.

Для аналізу впливу факторів на генерацію сонячних електростанцій можуть використовуватися три основні коефіцієнти кореляції: Пірсона, Спірмена та Кендалла. Кореляційно-регресійний аналіз має на меті визначення найсуттєвіших кількісних характеристик причинно-наслідкових зв'язків між різними процесами та явищами. Вибір відповідного коефіцієнта кореляції визначається особливостями вхідних даних.

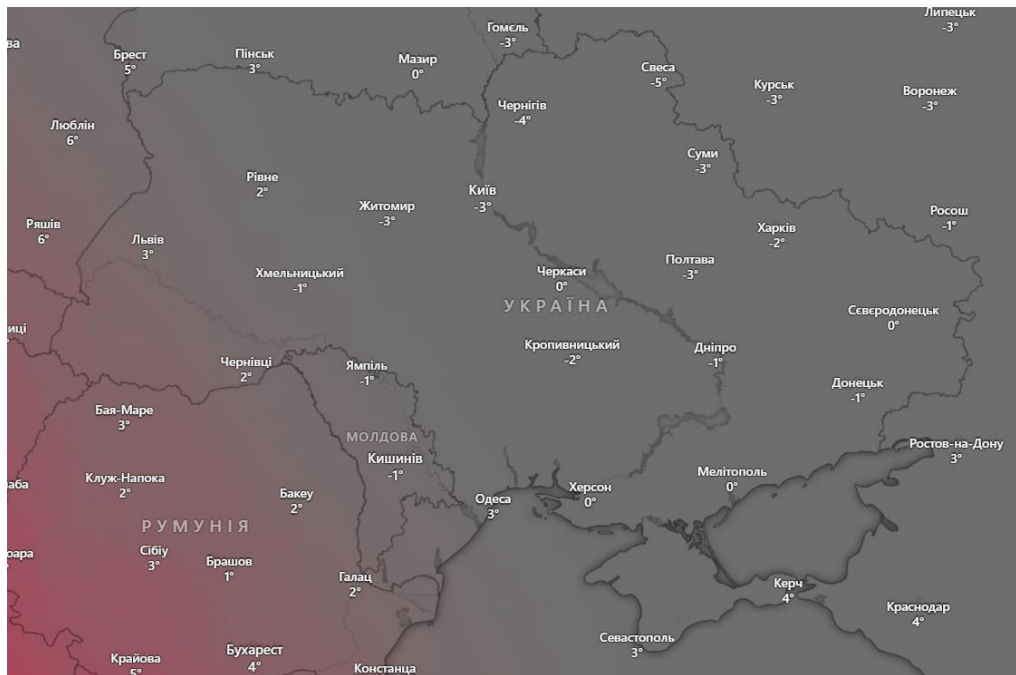
Коефіцієнт кореляції Пірсона є доцільним для безперервних змінних із лінійною залежністю за умови, що обидві змінні мають нормальний розподіл. Для змінних із нелінійною залежністю, порядкових категоріальних змінних або змінних із ненормальним розподілом використовуються ранговий коефіцієнт кореляції Спірмена або коефіцієнт кореляції Кендалла. Особливістю коефіцієнта Кендалла є те, що він базується на рангах змінних, проте не враховує різницю між ними, на відміну від коефіцієнта Спірмена.

Сонячні електростанції (СЕС) є одними з провідних джерел відновлюваної енергії, однак їх робота супроводжується низкою технічних викликів, серед яких головне місце займає нестабільність генерації. Ця проблема обумовлена кількома ключовими факторами, які впливають як на короткострокову, так і на довгострокову стабільність роботи СЕС.

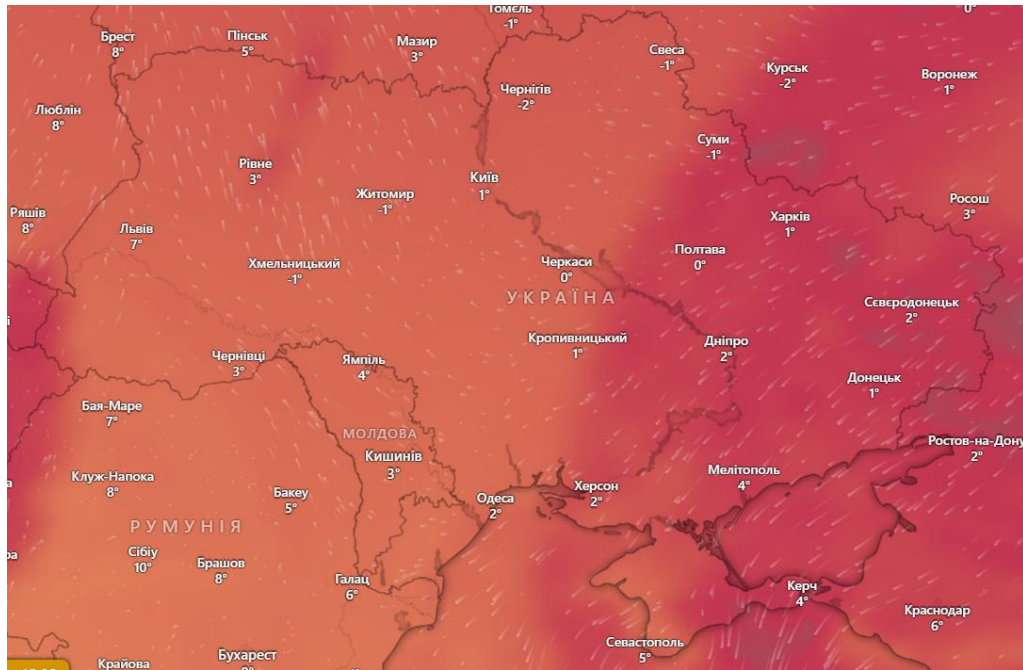
Головною причиною нестабільності генерації СЕС є їхня залежність від інтенсивності сонячного випромінювання, яке суттєво змінюється залежно від часу доби, пори року, хмарності та інших атмосферних явищ. Наприклад, раптові зміни погодних умов, такі як перехід від ясного неба до хмарного, викликають різкі коливання виробітку електроенергії. Ці коливання створюють труднощі для прогнозування та регулювання генерації, ускладнюючи забезпечення балансу між попитом і пропозицією в енергосистемі. На рис. 1.5 а-в показано рівні сонячної інсоляції для території України в різний час доби.



а)



б)



в)

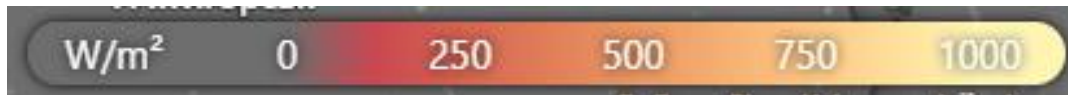


Рисунок 1.5 — рівень сонячної інсоляції для території України [7] станом на: а) 25.11.24 12:00; б) 25.11.24 15:00; в) 26.11.24 12:00

Інтенсивність сонячного випромінювання також залежить від географічного розташування та пори року. У зимовий період генерація знижується через коротший світловий день, меншу висоту сонця над горизонтом і можливе випадання снігу, який покриває фотомодулі. У літній період, навпаки, генерація може перевищувати попит у певні години, що створює ризик перевантаження мережі.

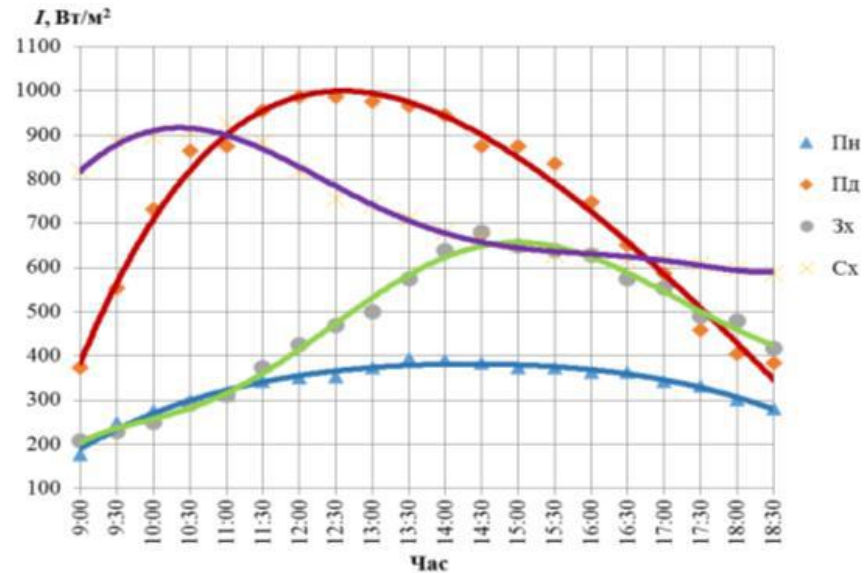


Рисунок 1.4. Зміна інтенсивності сонячної радіації в липні місяці для міста Львова, впродовж дня, для орієнтації похилої поверхні (кут 45°) у Північному (Пн), Південному (Пд), Західному (Зх) та Східному (Сх) напрямках.

[8]

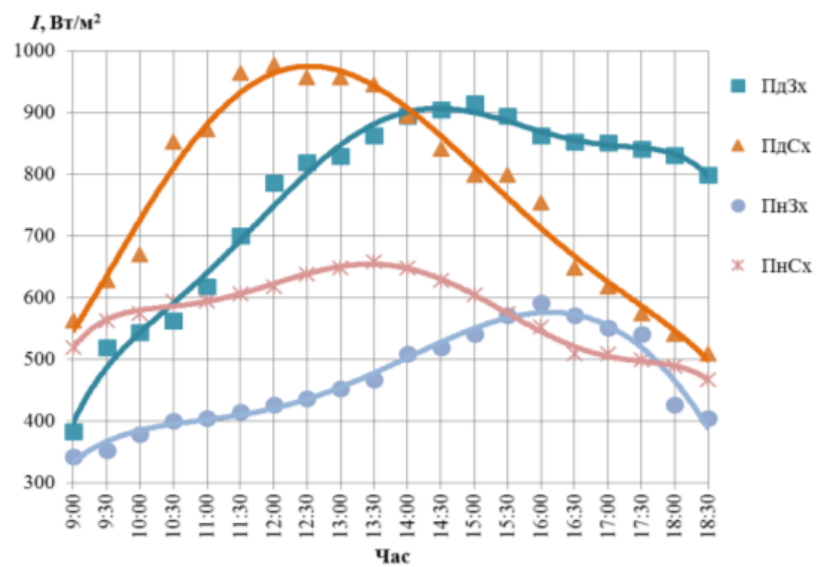


Рисунок 1.5. Зміна інтенсивності сонячної радіації в липні місяці для міста Львова, впродовж дня, для орієнтації похилої поверхні (кут 45°) у Південно-Західному (ПдЗх), Південно-Східному (ПдСх), Північно-Західному (ПнЗх) та Північно-Східному (ПнСх) напрямках. [8]

Вищенаведені рисунки доводять, що сонячна енергія без забезпечення належного рівня компенсації нездатна задовольнити вимоги до надійності електричної енергії.

СЕС не можуть генерувати електроенергію у нічний час через відсутність сонячного випромінювання. Це створює проблему для безперервного забезпечення споживачів енергією, особливо в регіонах із високою часткою СЕС у загальній генерації. Для компенсування такого провалу у виробництві необхідне залучення маневрових джерел енергії або накопичувальних систем, що збільшує навантаження на інфраструктуру.

Динамічні зміни рівня хмарності можуть викликати миттєві відхилення генерації СЕС. Наприклад, як видно з порівняння рис. 1.5 (а) та рис. 1.5 (б), суттєва зміна стану погоди протягом трьох годин спричинила падіння рівня сонячної інсоляції з середнього до нуля. Ці зміни особливо помітні в регіонах із змінним кліматом. Додатково, забруднення атмосфери (наприклад, пил або смог) знижує ефективність поглинання сонячного випромінювання фотомодулями, що ще більше ускладнює забезпечення стабільної генерації.

Ефективність роботи фотомодулів залежить від їхніх технічних характеристик, зокрема від температури навколишнього середовища. За високих температур їх продуктивність знижується через підвищення електричного опору матеріалів. Крім того, деградація фотомодулів із часом також впливає на стабільність виробництва енергії [8].

1.1.2 Нестабільність генерування ВЕС

За даними Міжнародного агентства з відновлюваної енергетики (IRENA), глобальний розвиток вітроенергетики демонструє стрімкі темпи. Зокрема, встановлена потужність вітрових електростанцій зросла з 7,5 ГВт у 1997 році до приблизно 564 ГВт у 2018 році, що означає збільшення майже у 75 разів. На сьогодні цей показник досяг 730 ГВт, і прогнози на майбутнє залишаються позитивними. Основні темпи зростання спостерігаються в країнах Азії, Північної Америки та Європейського Союзу, де лідерами є Данія, Іспанія, Ірландія та Німеччина.

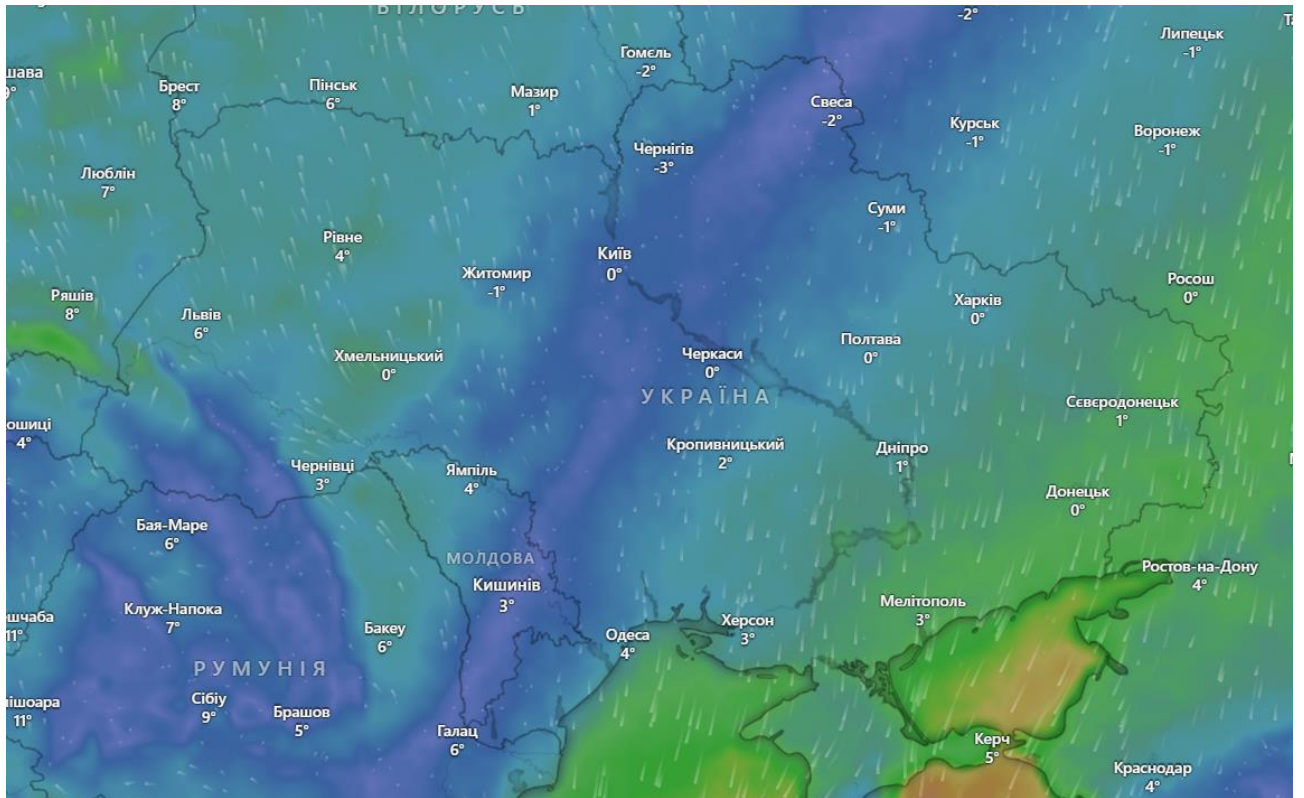
В Україні вітрові електростанції зосереджені в регіонах, які характеризуються сприятливими вітровими умовами, а саме на узбережжях Чорного та Азовського морів, у Карпатах і Криму, а також в Одеській, Херсонській і Миколаївській областях. За висновками Інституту відновлюваної енергетики НАН України, ці території мають найбільший потенціал для ефективного використання енергії вітру.

Національна енергетична компанія «Укренерго» зазначає, що встановлена потужність вітрових електростанцій в Україні досягла 1529 МВт, а Українська вітроенергетична асоціація прогнозує її зростання до 1750 МВт до кінця року. Це свідчить про динамічний розвиток цього сектору вітроенергетики та його значний внесок у енергетичний баланс країни.

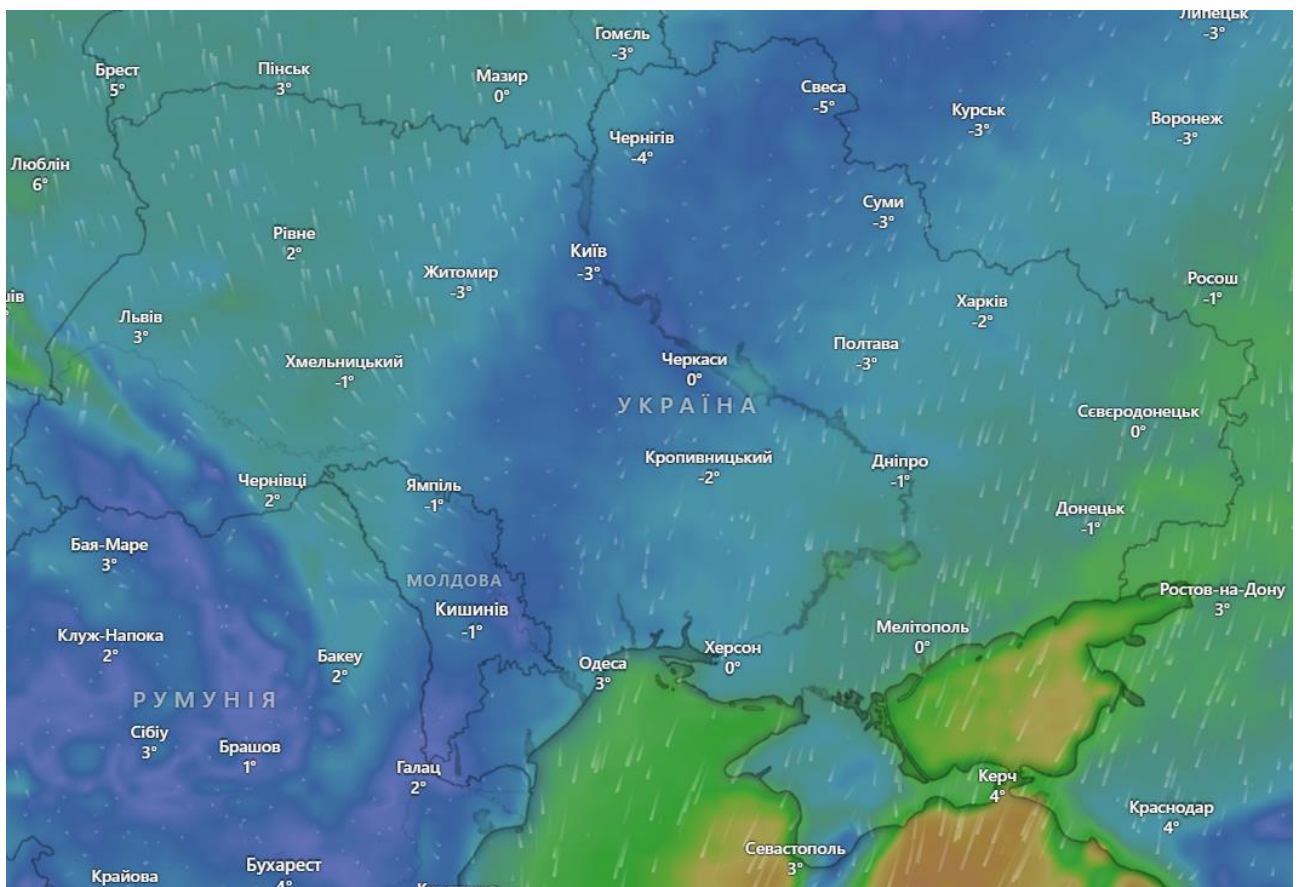
Річне виробництво енергії вітровою електростанцією залежить від змінності швидкості вітру і не дорівнює добутку її встановленої потужності на кількість годин у році. Коефіцієнт використання встановленої потужності (КВВП), що характеризує ефективність станції, становить 20–40%, досягаючи максимальних значень у сприятливих умовах.

На КВВП впливають такі чинники, як змінність швидкості вітру та розмір генератора. Менші генератори забезпечують вищий КВВП, але генерують менше енергії під час сильного вітру, тоді як більші — дорожчі й менш ефективні за слабого вітру. Оптимальний КВВП для вітрових електростанцій зазвичай знаходиться в межах 20–35%.

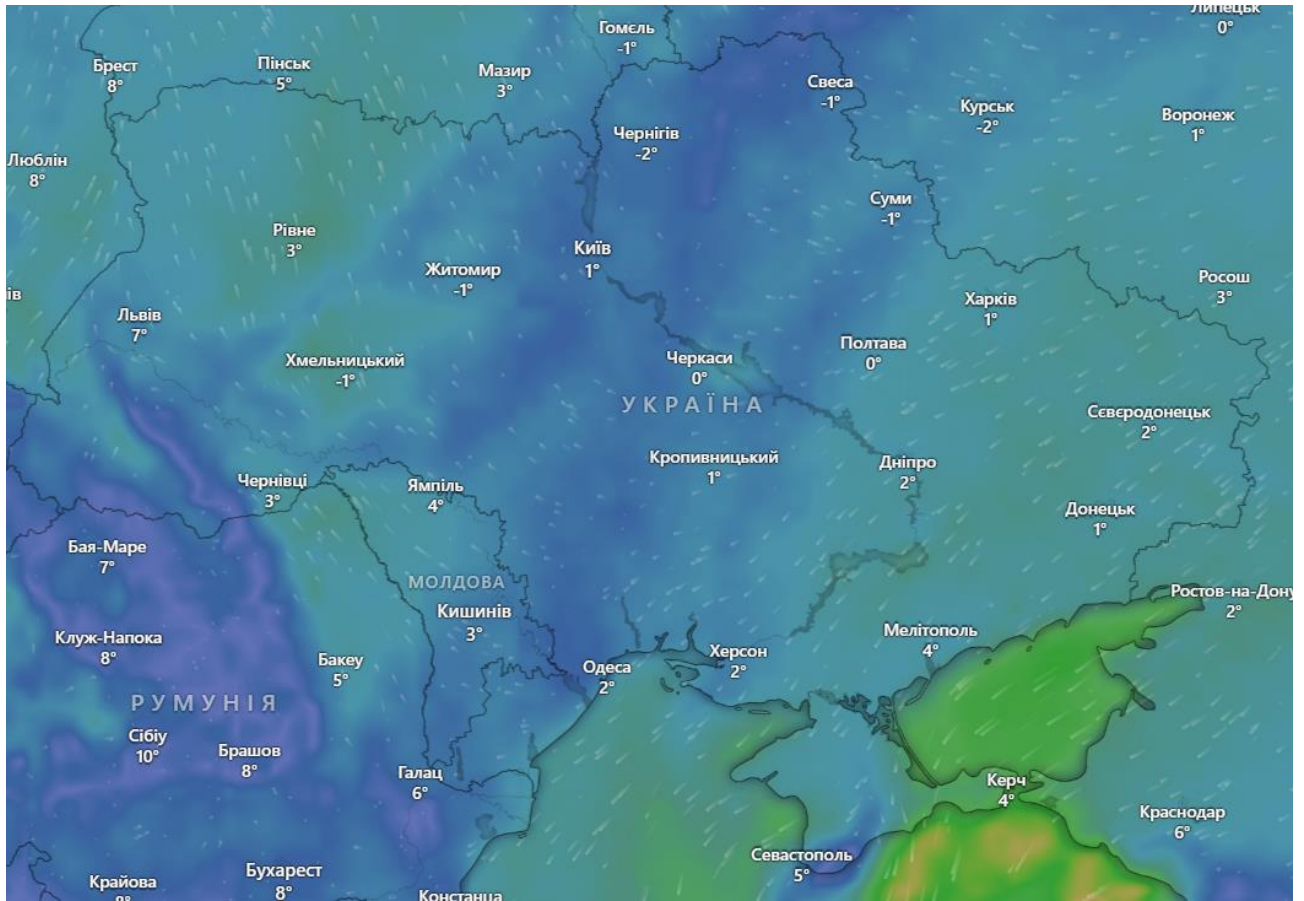
Виробництво електроенергії з вітру є змінним на різних часових масштабах, що створює труднощі для інтеграції в енергомережу, де баланс між генерацією та споживанням є критичним для стабільності. Низька прогнозованість короткострокового виробництва обумовлює необхідність резервних потужностей, управління попитом і впровадження накопичувальних рішень. Наприклад, карти швидкості вітрів для території України на рис. 1.6 а-в демонструють рівень непередбачуваності вітрової енергії.



а)



б)



в)



Рисунок 1.6 — карта швидкості вітрів для території України [7] станом на: а) 25.11.24 12:00; б) 25.11.24 17:00; в) 26.11.24 12:00

Таким чином, інтеграція вітрової енергії в енергосистему потребує підвищеної гнучкості мережі, але водночас знижує коефіцієнт використання потужності традиційних генераторів. Це дослідження зосереджене на аналізі впливу змінності вітру, рівня проникнення вітрової енергії, стратегій управління, а також точності прогнозування на стабільність і ефективність енергосистеми.

Вітрові електростанції генерують змінну активну потужність, причому в деяких системах споживання реактивної потужності залежить від активної. Це спричиняє коливання напруги, що впливає на стабільність енергосистеми та якість електроенергії для споживачів. Застосування силової електроніки у вітроенергетиці також сприяє появі вищих гармонік напруги та струму. Як

неконтрольоване джерело, вітер може ускладнювати забезпечення стабільності напруги та перехідних процесів.

Зростання кількості та потужності вітрових станцій, а також слабкість мережі в точках їх підключення, вимагають детального аналізу впливу вітрової генерації на енергосистему. Їх інтеграція змінює режими роботи мережі, потоки активної та реактивної потужності, вузлові напруги й енергетичні втрати.

Вплив вітрових електростанцій залежить від їх розташування відносно навантаження та кореляції між виробництвом і споживанням енергії. Вітрова генерація може змінювати напрямок потоків потужності, що призводить як до зниження, так і до зростання втрат енергії. Також вона впливає на виникнення «вузьких місць» у мережі, які можуть як послаблюватися, так і посилюватися залежно від місця розташування станції.

Для ефективного використання наявних ліній передачі застосовують регулювання вихідної потужності вітрових станцій і онлайн-моніторинг. У разі підключення до слабких мереж, віддалених від центрів споживання, може виникнути потреба у посиленні інфраструктури. Витрати на це суттєво залежать від специфіки розташування вітрових станцій і мережевої інфраструктури.

Сучасні вітрові станції відповідають галузевим вимогам, зокрема здатні працювати під час провалів напруги, постачати реактивну потужність, регулювати напругу на шинах і інтегруватися в системи СКАДА для управління потужністю[13, 14, 15].

Вітроенергетика використовує генератори з фіксованою (рис. 1.7) або змінною швидкістю. На початкових етапах розвитку переважали турбіни з фіксованою швидкістю й асинхронними генераторами. Такі генератори оснащували асинхронними машинами з короткозамкненим ротором, швидкість яких змінюється в межах заданих обмежень. Їх потужність регулюється зміною кута нахилу лопатей, а генерація пропорційна швидкості вітру. Через відсутність можливості регулювання реактивної потужності ці машини потребують систем компенсації реактивного навантаження.

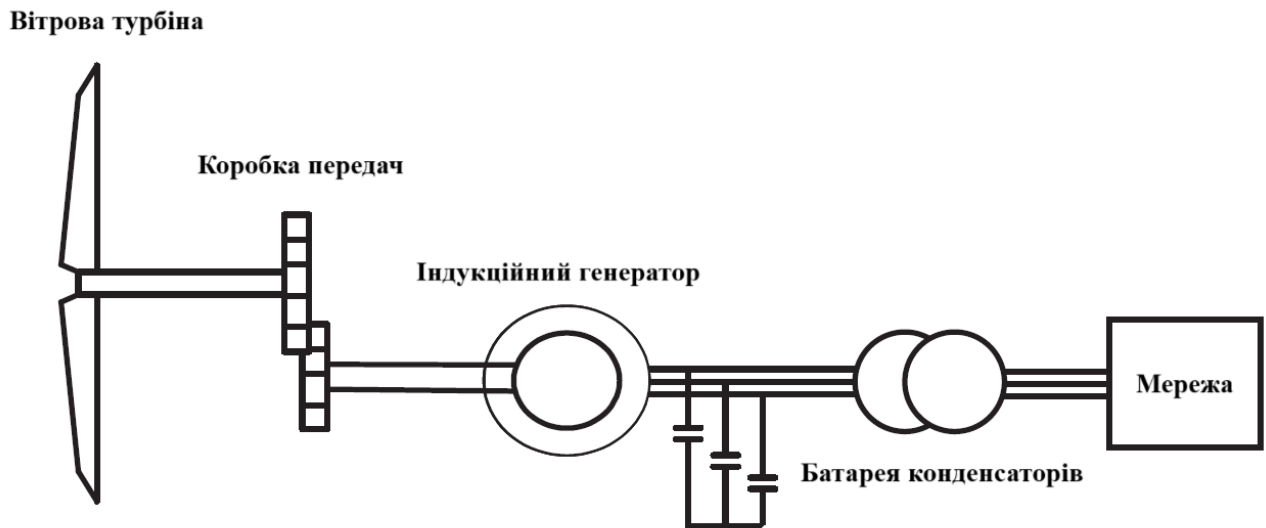


Рисунок 1.7 — структурна схема індукційного генератора зі сталою швидкістю
[10]

Системи змінної швидкості забезпечують роботу вітрових турбін з оптимальним співвідношенням швидкості кінчика лопаті до швидкості вітру, що дозволяє досягти максимального коефіцієнта потужності в широкому діапазоні вітрових швидкостей. Найбільш поширеними є генератори з подвійним живленням і синхронні генератори з перетворювачами.

Турбіни з подвійним живленням набувають популярності завдяки високій енергоефективності та керованості. Цей тип генератора є асинхронною машиною з обмоткою ротора, підключеною до перетворювача через кільця ковзання. Статор напряму під'єднується до мережі, а ротор – до силового перетворювача, як показано на рис. 1.8.

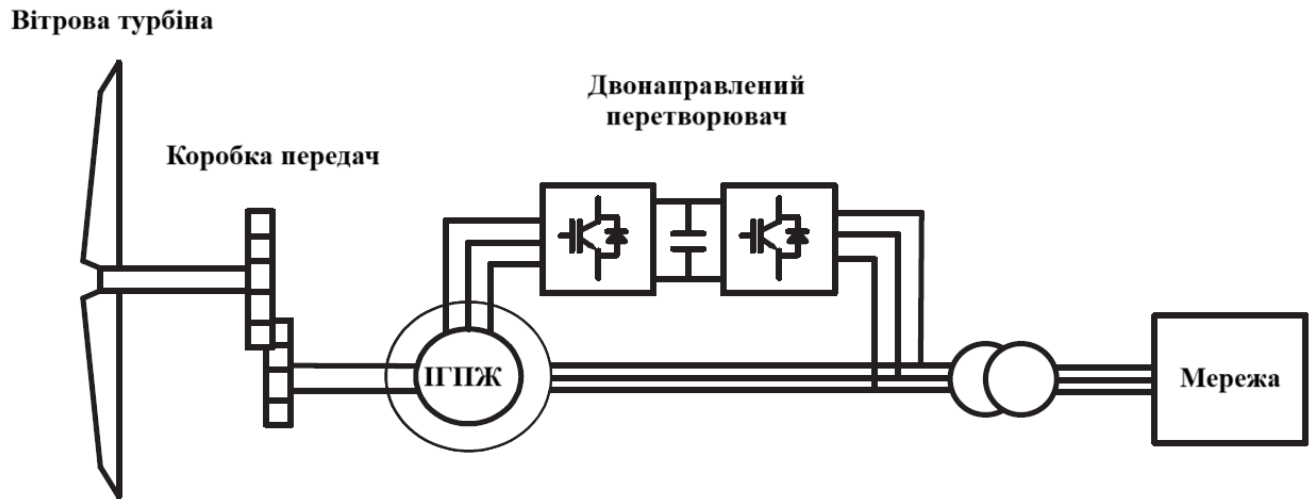


Рисунок 1.8 — структурна схема індукційного генератора з подвійним живленням (ІГПЖ) [10]

Перетворювальна система забезпечує двосторонній перехід енергії: перетворювач на стороні мережі постачає постійну напругу для перетворювача на стороні ротора, який генерує змінну трифазну напругу для ротора через кільця ковзання. Це дозволяє змінювати швидкість роботи генератора. При низьких швидкостях вітру зниження швидкості ротора може призвести до підсинхронного режиму, коли ротор поглинає енергію з мережі.

На високих швидкостях вітру вітрова турбіна DFIG, що працює на надсинхронній швидкості, передає потужність від ротора до мережі. Швидкість обертання ротора визначає, чи подається потужність до мережі через статор або через статор і ротор.

Частота постачання на ротор завжди контролюється таким чином, щоб комбінована швидкість ротора та швидкість обертання вектора магнітного потоку відповідала частоті мережі. Завдяки цьому потужність подається в мережу через статор в усіх трьох режимах роботи: підсинхронному, синхронному та надсинхронному. Це забезпечує DFIG унікальні переваги порівняно з традиційними асинхронними генераторами, які можуть подавати енергію лише на надсинхронній швидкості.

Цей тип турбін використовує синхронний генератор, який може бути електрично збудженим або з постійними магнітами. Для роботи на змінній швидкості генератор підключений до мережі через перетворювач змінної частоти, що ізолює генератор від мережі. Частота генератора змінюється зі швидкістю вітру, а частота мережі залишається сталою. Потужність перетворювача відповідає номінальній потужності генератора з урахуванням втрат. Структурна схема такого генератора зображена на рис. 1.9.

Вітрова турбіна

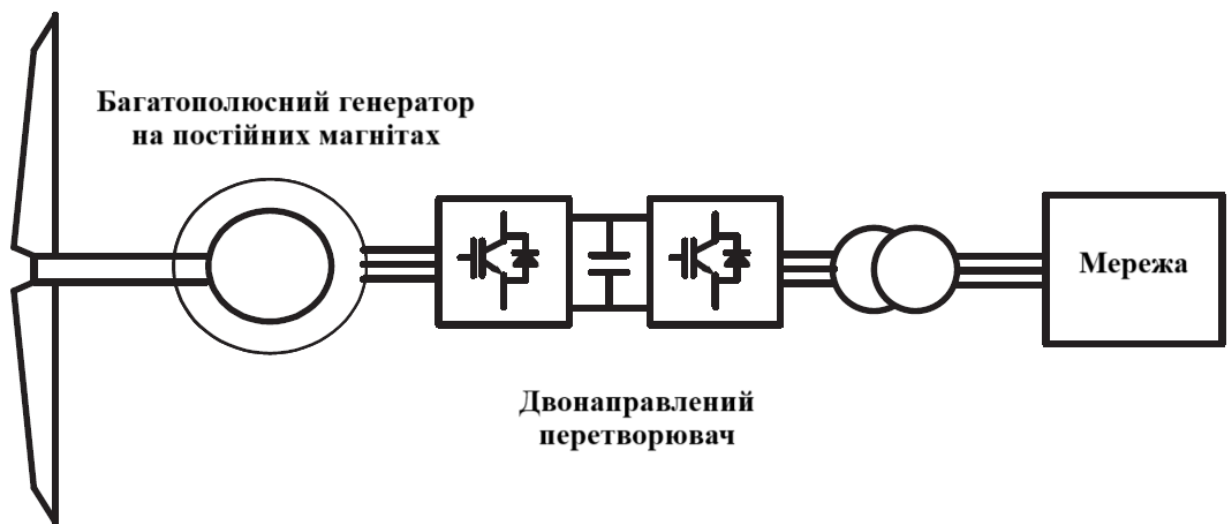


Рисунок 1.9 — структурна схема генератора з перетворювачем [10]

Для забезпечення стабільної роботи вітрових електростанцій (ВЕС) важливо контролювати реактивну потужність у межах, наближених до одиничного коефіцієнта потужності. Сучасні вітрові турбіни здатні надавати розширене керування реактивною потужністю, що сприяє підтримці енергосистеми. Їх можливості визначаються технологією та конструкцією, причому доступна реактивна потужність залежить від активної. Ця залежність зазвичай відображається у діаграмах PQ, які мають надаватися оператору системи передачі. Реактивну потужність можна використовувати для регулювання коефіцієнта потужності, постійного рівня реактивної потужності або автоматичного регулювання напруги в точці спільного з'єднання (РСС).

Важливо уникати індивідуального регулювання напруги окремими турбінами, щоб запобігти нестабільності чи надмірному потоку реактивної потужності.

Зростання частки вітрової енергетики збільшує вимоги до надання послуг із регулювання напруги. Традиційно це забезпечувалося центральними електростанціями, однак сучасні мережеві коди ставлять нові вимоги, що вимагають оптимізації стратегій керування реактивною потужністю, зокрема з урахуванням технічних характеристик ВЕС, роботи трансформаторів і використання компенсаційного обладнання.

Інерція синхронних генераторів відіграє ключову роль у стабільності енергосистеми під час перехідних процесів. Вона обмежує швидкість змін частоти за умов дефіциту генерації, забезпечуючи час для активації первинного контролю частоти. Стандартні генератори змінного струму з фіксованою швидкістю безпосередньо підключені до мережі, тому їх інерційна відповідь базується на передачі енергії через статор.

У змінношвидкісних вітрових турбінах використання електронних перетворювачів відокремлює швидкість обертання ротора від частоти мережі, що знижує їхній внесок у системну інерцію. Це може погіршити стабільність частоти в системах із низькою інерцією, зокрема в островних мережах або системах із високою часткою гідроенергетики. У відповідь дослідники розробляють технології, які імітують інерційну реакцію синхронних генераторів шляхом зміни активної потужності за допомогою регулювання кута лопатей чи швидкості ротора.

Для ефективного використання вітрової енергії необхідно оцінювати режим вітрових швидкостей у регіоні. Це дозволяє оптимізувати проектування систем та знижувати витрати на виробництво енергії. Метод функції щільності Вейбулла є популярним для аналізу вітрових навантажень, проте він має обмеження щодо врахування низьких швидкостей і добових варіацій вітру. Незважаючи на це, цей підхід залишається стандартним для обробки широкого спектра даних.

$$f(v) = \frac{k}{c} \cdot \left(\frac{v}{c}\right)^{k-1} \cdot e^{-\left(\frac{v}{c}\right)^k} \quad (1.1)$$

Тут $f(v)$ — це ймовірність спостереження швидкості вітру v , c — масштабний параметр Вейбулла, а k — безрозмірний параметр форми Вейбулла. Масштабний параметр c вказує на те, наскільки "вітряною" є розглянута місцевість, тоді як параметр форми k характеризує ступінь піковості розподілу швидкостей вітру (тобто, якщо швидкості вітру переважно знаходяться близько до певного значення, розподіл матиме високе значення k і буде дуже піковим). На рис. 1.10 показані ймовірнісні розподіли для місцевостей із низькою, середньою та високою швидкістю вітру. Графік ілюструє різницю в ймовірнісних розподілах між високими та низькими швидкостями вітру.

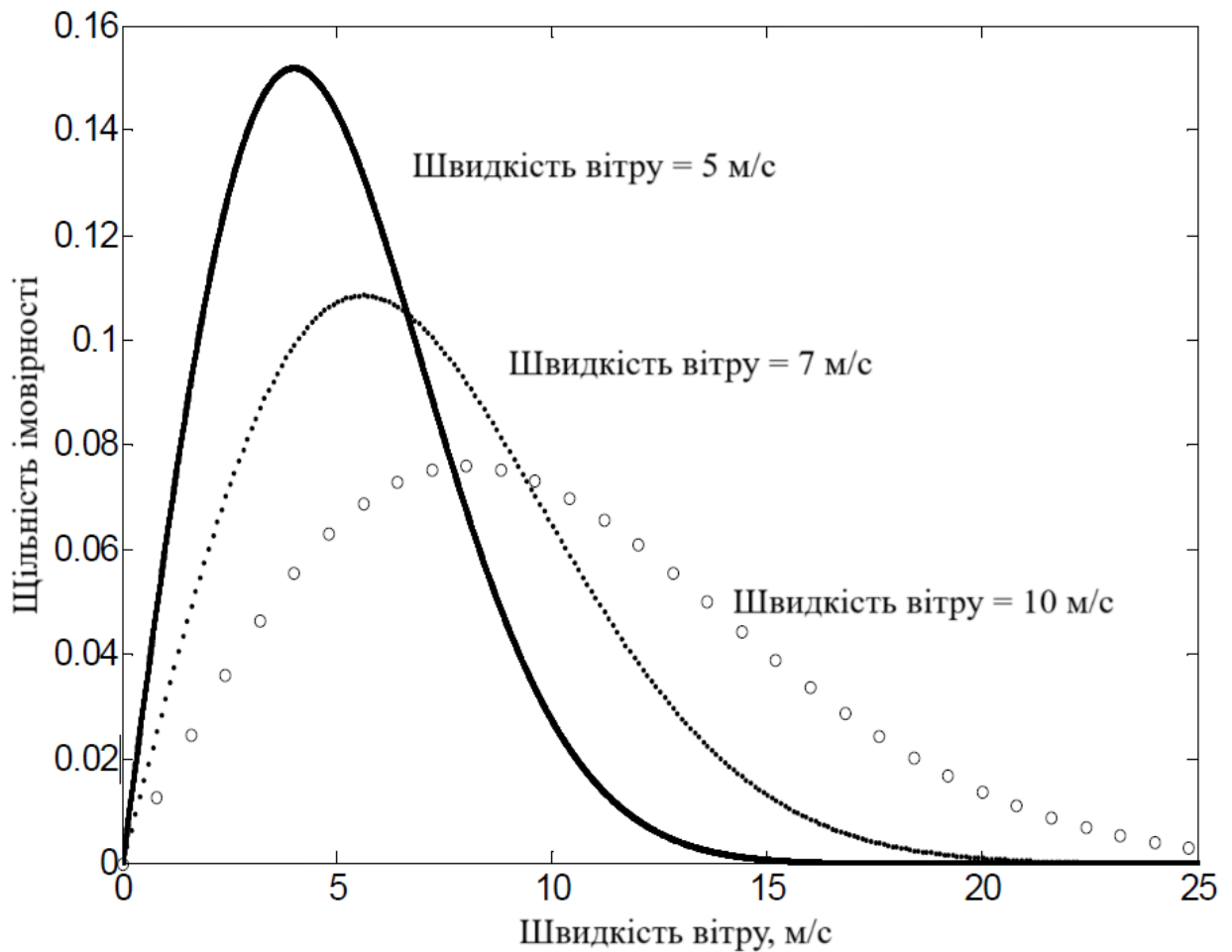


Рисунок 1.10 — розподіл ймовірності швидкості вітру [10]

Вітрова енергетика впливає на безпеку, надійність і ефективність роботи енергосистем, що потребує врахування динамічної взаємодії між великими вітровими електростанціями та мережею перед їх інтеграцією.

Переходячи від традиційних електростанцій до вітрових, енергосистема стикається з викликами частково невивченої технології. Високий рівень проникнення вітрової енергії можливий за умови належного підключення, інтеграції генерації, планування передачі та оптимізації операцій системи.

Сучасні вітрові турбіни, на відміну від попередніх моделей, здатні керувати активною й реактивною потужністю, витримувати низьку напругу (LVRT), відповідати на вимоги до нарощування потужності та, за потреби, брати участь у первинному регулюванні частоти. Це, однак, супроводжується додатковими енергетичними втратами.

Впливи вітрової енергетики поділяють на:

- Короткострокові: оперативне регулювання в часовому масштабі хвилин і годин.
- Довгострокові: вплив на планування мереж і генерації для забезпечення стабільності постачання.

Короткострокові

- Вимірювання напруги: Резерв реактивної потужності. Часовий масштаб — до кількох хвилин.
- Втрати через цикли: Неоптимальне використання теплової або гідроенергетичної потужності. Часовий масштаб — від 1 до 24 годин.
- Втрати (або вигоди) при передачі/розподілі: Часовий масштаб — від 1 до 24 годин.
- Резерви: Первинне та вторинне регулювання. Часовий масштаб — від кількох хвилин до однієї години.
- Невикористана енергія: Вітрова енергія перевищує рівень, який система може прийняти. Часовий масштаб — від кількох хвилин до однієї години.

Довгострокові

- Надійність системи: якість електроенергії. Часовий масштаб — від одного року до кількох років.

Рисунок 1.11 — вплив вітрової енергії на енергетичну систему, що спричиняє витрати на інтеграцію [11]

Для оцінки впливів різні часові масштаби зазвичай передбачають використання різних моделей у дослідженнях впливу. Саме тому ці впливи слід розділити на три основні напрямки: балансування, якість електроенергії та мережа.

Інтеграція відновлювальних джерел енергії на малих масштабах не вимагала додаткових вимірювань для балансування змінної потужності. Однак із зростанням частки вітрової енергії у енергосистемах порушення балансу стали частішими та більш суттєвими. Для управління цією змінністю використовується номінування потужності на наступний день на основі прогнозів. Кожен відповідальний за баланс може коригувати прогноз, щоб зменшити помилки та дисбаланси. Після закриття ринку залишкові дисбаланси компенсуються оператором системи передачі, що використовує резерви для коригування помилок прогнозування. Дисбаланси виникають через відхилення між

прогнозами та реальними коливаннями вітрової потужності, що може призводити до короткострокових та довгострокових дисбалансів.

Адекватність потужності визначається на основі загальної доступної потужності в пікові навантаження, враховуючи потреби в обслуговуванні генераційних потужностей і надійність системи. Оцінка необхідної потужності включає критерії, такі як очікувана втрата навантаження, ймовірність втрати навантаження та втрати енергії. Вітрова енергія має бути врахована в таких оцінках, зокрема через ефект географічного розсіювання та інтеграції в мережу.

Вплив вітрової енергії на мережу залежить від її розташування та кореляції з навантаженням і споживанням енергії. Вітрова енергія може змінювати напрямки потоків потужності, впливаючи на втрати та виникнення вузьких місць у мережі. Для оптимізації використання існуючих ліній передачі застосовуються різноманітні технології, такі як використання онлайн-інформації та системи управління потужністю. Однак для забезпечення адекватності та безпеки мережі може знадобитися її посилення. Для підтримання стабільності енергосистеми на різних етапах вітрові електростанції можуть бути зобов'язані виконувати певні функції управління і контролю залежно від рівня їх інтеграції.

Дослідження показують, що для окремої вітрової турбіни зміни вихідної потужності мінімальні на часових масштабах до кількох секунд; для вітрових електростанцій — на масштабах десятків секунд завдяки усередненню виходу потужності турбін; для кількох вітрових станцій на великій території зміни потужності незначні на масштабах від кількох до десятків хвилин. Зміни потужності, виробленої великою кількістю турбін, є меншими через ефект згладжування завдяки низькій просторовій кореляції вітру на окремих турбінах.

Для забезпечення надійності постачання нові технічні вимоги для мереж передачі включають можливість вітрових станцій витримувати зниження напруги та контроль частоти, що дозволяє регулювати активну потужність вітрових електростанцій відповідно до характеристик, визначених оператором мережі. У разі різкого зростання попиту на реактивну потужність після порушення стабільності енергосистеми, резерви реактивної потужності мають

забезпечувати генератори і компенсатори. Вітрові електростанції повинні залишатися підключеними до системи під час відновлення напруги, щоб підтримувати подачу реактивної потужності.

Однією з проблем є зниження ефективності роботи перетворювачів потужності при зниженні напруги, що може призвести до їхнього пошкодження. Для вирішення цієї проблеми були розроблені нові стратегії контролю, що дозволяють зберігати струми в межах допустимих значень навіть за зниженої напруги.

Зі збільшенням частки вітрових турбін, які не залежать від швидкості обертання, інерція енергосистеми зменшується, що веде до швидших змін частоти. Для відновлення інерції було запропоновано додатковий контур управління, який дозволяє турбінам компенсувати зниження частоти.

Хоча деякі оператори мереж вимагають від вітрових електростанцій участі в компенсації частоти та напруги, сектор вітрової енергетики виступає за менш жорсткі вимоги. Він пропонує економічно ефективнішу модель, в якій основну роль у регулюванні частоти виконують традиційні електростанції, а вітрові — тільки в разі вичерпання резервів.

Інтеграція вітрової енергії ускладнюється через підвищене навантаження на лінії передачі та зниження синхронізації в енергосистемах через збільшення частки генераторів з переривчастими характеристиками. Для покращення інтеграції вітрової енергії необхідно удосконалювати моделі та характеристики вітрових електростанцій, поліпшувати гнучкість енергосистеми, враховувати прогнози виходу енергії, розширювати ринки та вдосконалювати правила для погодних ресурсів.

Зі зростанням встановлення вітрових електростанцій очікується більше досліджень, які дозволять краще зрозуміти їхній вплив на енергосистеми та знайти економічні способи зниження варіативності та невизначеності вітрової енергії.

1.1.3 Геотермальна енергетика

Геотермальна енергетика використовує гарячі джерела та термальні підземні води для промислової генерації електроенергії, основне джерело якої – постійний потік теплоти з гарячих надр, спрямований до поверхні Землі. Підвищена температура у земній корі формується внаслідок тертя ядра, радіоактивного розпаду елементів та хімічних реакцій.

Основним показником використаності геотермальних джерел є їхня природна температура. Існують низькотермальні джерела з температурою 40-70 °C, середньотермальні з температурою 70-100 °C, високотермальні джерела та пара з температурою 100-150 °C, а також джерела з температурою понад 150 °C.

Геотермальна енергія широко використовується для теплопостачання та вироблення електроенергії в ряді країн, таких як: Угорщина, Ісландія, Італія, Мексика, Нова Зеландія, США та Японія. Наприклад, в Ісландії близько чверті електроенергії виробляється за рахунок геотермальної енергії.

Станом на 2008 рік у світі було встановлено геотермальні генераторні установки з потужністю приблизно 11 ГВт, що забезпечило виробництво 55 ТВт·год електроенергії.

Геотермальна енергетика має вплив на навколишнє середовище через кілька факторів. Використання води включає в себе проблеми, пов'язані з вмістом сірки, солей та інших домішок у гарячій воді з підземних резервуарів. Багато геотермальних установок мають системи замкнутого контуру, а також використовують воду для охолодження та повторного використання. Залежно від технології, використання геотермальної енергії може споживати від 6500 до 15000 літрів води на МВт·год. Однак, для охолодження часто використовується сама геотермальна вода, що зменшує вплив на якість води.

Забруднення повітря відрізняється в залежності від того, чи є система замкнутим або відкритим контуром. Системи з відкритим контуром можуть виділяти сірководень, діоксид вуглецю, аміак та метан. Хоча виділення діоксиду сірки може призводити до кислих дощів, його викиди набагато менші (на МВт·год) порівняно з вугільними електростанціями. Іноді можуть відбуватись

незначні викиди ртуті, які вимагають використання фільтрів. Токсичний осад необхідно належним чином утилізувати на спеціальних майданчиках.

Використання землі для геотермальних станцій залежить від резервів, потужності, типу системи конверсії енергії, способу охолодження, розташування свердловин та трубопроводів, а також допоміжних споруд. Найбільша геотермальна електростанція має потужність 1517 МВт і займає площу 78 квадратних кілометрів, що відповідає 13 акрам на МВт.

Викачування води може спричинити осідання ґрунту, і тому охолоджену воду часто повертають назад у геотермальні резервуари, щоб уникнути цього. Гідротермальні резервуари розташовані в геологічних "гарячих точках", які мають високий рівень сейсмічної активності. Існують докази того, що використання геотермальної енергії може збільшити частоту землетрусів. Тому геотермальні системи зазвичай розташовують далеко від населених районів.

1.1.4 Біоенергетика

Біомаса, як джерело енергії, до нещодавна використовувалась прямим спалюванням у відкритому вогні або в печах з низьким коефіцієнтом корисної дії. Під біомасою мають на увазі органічні речовини, які отримуються з рослин під час фотосинтезу та можуть бути використані для отримання енергії. До них належать різні види рослин, відходи сільськогосподарської, деревообробної та інших галузей промисловості, а також побутові відходи.

Біомаса відіграє значну роль у енергобалансах промислово розвинених країн. У США її частка становить 4%, у Данії - 6%, у Канаді - 7%, у Австрії - 14% та у Швеції - 16% від загального споживання первинних енергоресурсів цих країн. У 2004 році встановлена потужність електростанцій, які використовують біомасу, склала 39 ГВт.

Найпоширенішими способами використання біомаси в електроенергетиці є фізичний метод (тобто пряме спалювання), піроліз, газифікація, виробництво спиртів та масел для отримання моторного палива (хімічні методи), а також анаеробна ферментація з утворенням метану (мікробіологічний метод).

Використання хімічної енергії біомаси є значним ресурсом для відновлюваної енергетики. Біомасу можна вирощувати безпосередньо для виробництва енергії або використовувати відходи біологічної маси, яка призначена для інших цілей.

Але для задоволення поточного попиту на первинну енергію необхідно збільшити виробництво енергії з біомаси в 7 разів, а до 2100 року - навіть в 40 разів, враховуючи прогнози економічного та енергетичного зростання споживання. Люди вже відповідають за 30-40% вуглецю, пов'язаного з фотосинтезом, у всьому світі, що вказує на потребу у додатковому зборі біомаси, що може призвести до стресу для екосистем і навіть до вимирання видів тварин, яких позбавлено життєво важливих джерел їжі. Наприклад, понад половину загального обсягу захоплення енергії рослинністю в Сполучених Штатах належить сільськогосподарським культурам і лісівництву, тоді як решта біомаси потрібна для забезпечення функцій і різноманітності екосистем. Проте, енергія, отримана з біомаси, може задовольнити лише незначну частину річного споживання енергії в США. Щоб забезпечити потреби в енергії на світовому рівні виключно за рахунок біомаси, потрібно було б використати понад 10% поверхні Землі, що приблизно рівносильно площі, використовуваній для всього світового сільського господарства (тобто близько 1,5 мільярда гектарів). Це свідчить про те, що подальше розширення використання біомаси для вироблення енергії замість продовольства буде важким завданням без етичних конфліктів, особливо з урахуванням поточної статистики голоду у світі.

1.1.5 Гідроенергетика

Гідроенергетика представляє собою сферу економічної діяльності, а також систему гідроелектростанцій, які призначені для перетворення кінетичної енергії руху води на електричну. Ці електростанції використовують потенціальну енергію водних потоків, яка надходить від Сонця, що випаровує воду, яка потім опадає у вигляді дощу на висотах і стікає вниз, утворюючи ріки.

Гідроелектростанції зазвичай будуються на річках шляхом створення гребель і водосховищ. Також можливе використання кінетичної енергії руху води на вільнопотокових (дериваційних) гідроелектростанціях.

Завдяки великій щільності води, яка близько в 800 разів перевищує щільність повітря, навіть повільні водні потоки або слабкі океанські течії можуть забезпечувати значну кількість енергії.

На 2006 рік гідроенергетика забезпечувала до 88% відновлюваної енергії і до 20% загального обсягу виробництва електроенергії в світі. Загальна встановлена потужність гідроелектростанцій досягла 777 ГВт.

Останніми роками проводяться серйозні дослідження щодо практичного використання потужного потенціалу морських і океанських течій (енергія температурного градієнту Світового Океану), які поділяються на постійні, мусонні (пасатні) та припливно-відпливні. Зокрема, розглядається можливість використання енергії головних постійних течій, таких як Гольфстрім і Куросіо, загальний енергетичний потенціал яких, за різними оцінками, варіюється від 5 до 300 ТВт.

Гідроелектростанції можуть мати великі греблі або розташовуватись на річкових течіях. З урахуванням екологічних проблем, таких як міграція риби та пошкодження водних екосистем, будівництво нових гребель для гідроелектростанцій малоймовірне в багатьох країнах. Гідроелектростанції на рівнинних місцевостях потребують значно більше площі, ніж ті, що розташовані в гористих районах або каньйонах, де глибші водойми. Наприклад, гідроелектростанція Balbina в Бразилії займає площу 2360 квадратних кілометрів, але має потужність лише 250 МВт (більше 800 гектарів на МВт). У той же час, гідроелектростанція потужністю 10 МВт в гористій місцевості займає менше 1 гектару. Затоплення земель для створення водосховищ гідроелектростанцій має серйозні наслідки для природи: знищення лісів, місць проживання диких тварин, сільськогосподарських угідь та зон відпочинку. У багатьох випадках цілі громади повинні бути переселені (приклад – Дністровська ГЕС). Водосховища використовуються для різних цілей, таких як зрошення

угідь, боротьба з повенями та рекреація, що має додатковий вплив на дику природу. Це також має безпосередній негативний вплив на водні екосистеми, оскільки риба та інші організми можуть постраждати внаслідок контакту з турбінами.

Поміж прямого контакту, також відбувається вплив на режим течії, що призводить до зміни кількості поживних речовин та водоростей. Це може вимагати видалення або введення трав'яних риб. Зростають втрати води через випаровування. Крім того, русло нижче греблі може зазнавати змін, тому необхідно регулювати відбір води в певні періоди року. Водосховище, як правило, має нижчий рівень кисню й іншу температуру. Для пом'якшення цих впливів використовуються багаторівневі водозабори, які беруть воду з різних глибин водойми.

1.2 Використання накопичувачів енергії для підвищення стабільності генерування негарантованих джерел енергії

Однією з ключових проблем при розробці та впровадженні відновлюваних джерел енергії є проблема акумуляції виробленої ними енергії. Особливо гостро ця проблема стоїть для автономних мікромережевих енергосистем з відновлюваними джерелами енергії, які працюють для окремого споживача (житловий будинок, малоенергетичний технічний або сільськогосподарський об'єкт тощо).

Фактори, які впливають на виробництво відновлюваної енергії, у багатьох випадках є випадковими (швидкість вітру, інтенсивність сонячного випромінювання тощо). Тому величина виробленої потужності перетворювачами також є випадковою і може коливатись у досить широких межах.

Коливання вихідних параметрів генеруючих перетворювальних пристроїв дестабілізують роботу споживачів, утруднюють передачу та розподіл енергії, різко знижують надійність та ефективність застосування відновлюваних джерел енергії. Для вирішення проблеми безперебійного живлення споживачів енергією з відновлюваних джерел використовують різні способи акумуляції енергії.

Отже, пристрій для акумуляції є невід'ємною та дуже важливою складовою автономної енергетичної системи, яка не пов'язана зі загальною енергетичною системою. Існують різні способи та пристрої для акумулювання енергії відновлюваних джерел, основні з яких зображені на рисунку 1.12.



Рисунок 1.12 Методи акумулювання відновлювальної енергії

Електрична енергія W_E , що виробляється перетворювачем (генератором), в загальному випадку визначатиметься виразом:

$$W_E = \int_0^t u(t)i(t)dt, \quad (1.2)$$

де $u(t)$ та $i(t)$ – напруга та струм на виводах перетворювача,
 t – тривалість роботи перетворювача

Частина енергії може бути спрямована в акумулюючий пристрій (накопичувач). Накопичувачі поділяються за типом накопичуваної енергії, способами її акумулювання та зберігання. Досить поширеним способом акумулювання енергії відновлюваних джерел є використання конденсаторів

(суперконденсаторів). Енергія W_C , яка накопичується в електричному полі конденсатора ємністю C , дорівнює:

$$W_C = \frac{C \cdot U^2}{2}, \quad (1.3)$$

де U – напруга на обкладках конденсатора,

Якщо використовувати конденсатори з високою специфічною ємністю, то можна успішно вирішувати проблеми накопичення енергії в автономних енергетичних системах з відновлюваними джерелами. Однак висока вартість і недоліки експлуатаційного характеру суттєво обмежують область їх застосування.

Дуальним до ємнісного способу є магнітний спосіб акумулювання енергії - у котушці індуктивності, через обмотку якої протікає струм I . Енергія магнітного поля W_L котушки з індуктивністю L в цьому випадку дорівнюватиме:

$$W_L = \frac{L \cdot I^2}{2}, \quad (1.4)$$

Для отримання достатньої енергетичної ємності котушки в практиці необхідно мати надпровідний контур. Таким чином, реальний магнітний накопичувач представляє собою котушку індуктивності з надпровідною обмоткою. Такі накопичувачі є достатньо перспективними, оскільки мають КПД до 95-97%, але через складність конструкції їх поширення в даний час обмежується.

Широко поширеними пристроями накопичення та зберігання енергії є електрохімічні акумулятори, які перетворюють, як відомо, під час заряду електричну енергію в хімічну, а під час розряду - навпаки, хімічну енергію в електричну. На сьогоднішній день виробляються електрохімічні акумулятори

різних типів, що відрізняються специфічною енергією, ємністю і розмірами. Конструкція і принцип дії електрохімічних акумуляторів постійно вдосконалюються і все більше задовольняють зростаючим вимогам енергетичної промисловості.

Акумулятори теплової енергії можуть бути реалізовані різними способами. Використовуючи дисипативний принцип дії резистивного елемента електричного кола (активного опору), можна поєднати перетворення електричної енергії в теплову з її подальшим зберіганням у вигляді ізольованого теплоносія. Рівняння перетворення електричної енергії в теплову має вигляд (Закон Джоуля-Ленца):

$$Q = I^2 R \Delta t = mC(T_2 - T_1) \quad (1.5)$$

де I – струм,

R – опір,

Δt – час протікання струму,

m – маса енергоносія,

C – питома теплоємність енергоносія,

T_1, T_2 – початкова та кінцева температури енергоносія.

Використання описаних теплових акумуляторів легко реалізовується в достатньо широкому діапазоні температур та обсягів накопичуваної енергії; це досить простий і надійний метод. Його можна ефективно використовувати для утилізації неочікуваних надлишків енергії, що виробляється автономним багатофункціональним енергетичним комплексом.

Інерційний (механічний) накопичувач енергії складається з маховика, що має великий момент інерції, та трансмісій (або зубчастих передач), які служать для подачі та відведення енергії. Запасена кінетична енергія, накопичена маховиком, дорівнює:

$$W_K = \frac{J \cdot \omega^2}{2}, \quad (1.6)$$

де J – момент інерції маховика відносно осі обертання,
 ω – кутова швидкість.

Як видно з формули (1.6), запасена кінетична енергія пропорційна квадрату кутової швидкості, тому для збільшення накопиченої енергії потрібно збільшити швидкість обертання. Однак при великих швидкостях виникають значні центробіжні сили, які можуть призвести до руйнування маховика.

Пневматичний спосіб накопичення енергії може бути реалізований у вигляді газотурбінної електростанції з повітряним накопичувачем. Ці електростанції є досить складними спорудами; вони розраховані на значну потужність і не можуть використовуватись для невеликих автономних енергетичних комплексів, що працюють на відновлюваній енергії.

Принцип гідравлічного накопичення енергії полягає в тому, що за допомогою гідромашин піднімають воду на певну висоту Δh ; при цьому накопичується потенційна енергія W_G , що дорівнює:

$$W_G = mgh_2 - mgh_1 = mg\Delta h, \quad (1.7)$$

де m – маса води,

h_1 та h_2 – початкова та кінцева висота переміщення,

g – прискорення вільного падіння, 9.8 м/с^2

Гідравлічне накопичення може бути застосоване як до потужних енергосистем з використанням водосховищ ГЕС, так і до невеликих автономних енергетичних комплексів з використанням штучних резервуарів для

накопичення піднятої води, потенційна енергія якої потім перетворюється на електричну енергію.

Зазначений на рис. 1.12 комбінований метод накопичення відновлюваної енергії може включати пристрої різних типів, наприклад, ємнісного, теплового і гідравлічного, одночасно. Він є перспективним як для потужних пристроїв перетворення природних енергетичних потоків на зручну для використання енергію, так і для невеликих автономних енергетичних комплексів, тим більше що останні можуть складатись з первинних перетворювачів різних типів.

Оптимістичні результати спостерігаються для комбінації вітрової та сонячної енергії. Достатньо мати акумулятор ємністю на 2 доби, щоб забезпечити стабільну потужність, яка не опускатиметься нижче 0,3 від середньорічного значення. Зважаючи на вартість технічних засобів вітро- та сонячної енергетики, а також систем накопичення, можна знайти оптимальне рішення щодо співвідношення потужностей, яке буде економічно вигідним.

Акумулятори є важливою і, можливо, найдорожчою складовою альтернативних систем. Надійність і комфорт експлуатації енергетичної установки залежать від якості та ємності акумуляторів. Не кожна батарея може бути використана в гібридному комплексі "вітрогенератор + фотоелектричні модулі". Акумулятори для таких комплексів повинні відповідати особливим технічним характеристикам і мати підвищену надійність, здатність до тривалих і глибоких циклів заряду-розряду.

1.3 Висновки

Отже, проблема нестабільності стосується лише певних типів відновлюваних джерел енергії, переважно вітрових та сонячних, і у меншій мірі гідроелектроенергії. Значущість цієї "передбачуваної" мінливості залежить від різних факторів, включно з рівнем їхнього впровадження на ринку, балансом джерел енергії, гнучкістю енергетичної мережі та гнучкістю попиту. При високому рівні впровадження відновлюваних джерел енергії на ринку потрібні ретельний аналіз та управління, а також додаткові витрати, що можуть включати диспетчеризацію резервного генерування або модифікацію енергетичної

системи. Вже існує відсоток виробленої електроенергії з відновлюваних джерел у діапазоні від 20% до 50% в кількох європейських системах, хоча це стосується складної європейської енергетичної системи в цілому.

2 ПЕРЕВАГИ ТА ПРАКТИЧНЕ ЗАСТОСУВАННЯ МЕТОДУ КРИТЕРІАЛЬНОГО ПРОГРАМУВАННЯ У ЗАДАЧАХ ВІДНОВЛЮВАЛЬНИХ ДЖЕРЕЛ ЕНЕРГІЇ

Метод критеріального програмування є високоефективним підходом до багатокритеріальної оптимізації, що забезпечує можливість аналізу й ухвалення рішень у складних ситуаціях, де присутні численні взаємопов'язані та суперечливі критерії. У галузі енергетики цей метод отримав особливе визнання, оскільки дозволяє оптимізувати використання відновлюваних джерел енергії (ВДЕ) з урахуванням ключових екологічних, економічних і технічних аспектів. Такий комплексний підхід сприяє зменшенню негативного впливу на довкілля, забезпеченню раціонального використання природних ресурсів, підвищенню енергоефективності й економічної доцільності енергетичних проєктів.

У контексті глобального переходу до низьковуглецевої економіки важливість використання методів багатокритеріальної оптимізації, таких як критеріальне програмування, зростає, адже воно сприяє впровадженню інноваційних підходів до управління енергетичними системами. Метод дозволяє гармонізувати екологічні вимоги з економічною вигодою та технічною життєздатністю проєктів, забезпечуючи стабільність енергопостачання, мінімізацію експлуатаційних витрат і скорочення викидів парникових газів. Зокрема, цей підхід є важливим у задачах інтеграції ВДЕ до енергомереж, оптимального розташування об'єктів генерації, прогнозування енергетичних балансів і проектування автономних систем енергозабезпечення.

Метод критеріального програмування є одним із найбільш поширених підходів до розв'язання багатокритеріальних задач оптимізації. Він заснований на формалізації проблеми у вигляді сукупності цільових функцій, кожна з яких відповідає окремому критерію оцінки ефективності рішення. Основна мета полягає у досягненні компромісу між різними критеріями з урахуванням встановлених обмежень.

Процес починається з визначення цілей, де для кожного критерію встановлюються бажані значення, які характеризують ідеальний сценарій. Ці значення можуть бути недостижними в реальних умовах, тому вводяться поняття відхилень — позитивних або негативних — які враховують фактичні розбіжності між бажаними і реальними показниками. Ці відхилення інтегруються у загальну цільову функцію, що формується шляхом побудови функції компромісу. Ця функція може враховувати суму, максимум або середньозважене значення відхилень залежно від обраного підходу [12].

Важливою складовою методу є пріоритизація критеріїв, яка реалізується через встановлення вагових коефіцієнтів. Коефіцієнти визначають ступінь важливості кожного критерію у загальній моделі, забезпечуючи більший вплив критеріям з вищими пріоритетами. Цей процес дозволяє адаптувати метод до конкретних задач і враховувати специфіку кожної проблеми.

Результатом застосування критеріального програмування є рішення, яке максимально наближене до ідеального варіанту за всіма критеріями одночасно. Метод забезпечує прозорість процесу оптимізації та дозволяє виявити компромісні рішення, які враховують потреби різних зацікавлених сторін. У задачах енергетики цей підхід є надзвичайно ефективним, оскільки дозволяє збалансувати екологічні, економічні та технічні показники, що мають ключове значення для сталого розвитку енергетичного сектору.

2.1 Використання методу у задачах енергетики

2.1.1 Екологічні критерії

У контексті відновлюваних джерел енергії (ВДЕ) екологічні критерії відіграють ключову роль, оскільки основною метою переходу на ВДЕ є мінімізація впливу енергетичної галузі на довкілля. Вони включають зменшення викидів парникових газів, що сприяє уповільненню кліматичних змін, а також зниження рівня забруднення повітря та води, які впливають на здоров'я людей і екосистем. Крім того, враховуються аспекти захисту біорізноманіття, зокрема мінімізація негативного впливу на природні середовища, спричиненого будівництвом і експлуатацією енергетичних об'єктів.

Метод критеріального програмування дозволяє інтегрувати ці екологічні показники у процес оптимізації шляхом включення відповідних цільових функцій та обмежень. Наприклад, викиди CO₂ можуть бути представлені у вигляді функції, яку потрібно мінімізувати, а обмеження можуть встановлюватися для допустимого рівня забруднення. Завдяки цьому, енергетичні системи можуть проєктуватися так, щоб забезпечувати екологічну стійкість при впровадженні ВДЕ.

2.1.2 Економічні критерії

Економічна ефективність є ключовим фактором успішного впровадження ВДЕ. Серед основних економічних критеріїв — мінімізація загальних витрат на виробництво, транспортування та зберігання енергії. Також враховується вартість обладнання, витрати на його обслуговування та економія за рахунок зменшення залежності від викопного палива.

Метод критеріального програмування дозволяє враховувати взаємодію між цими економічними факторами. Наприклад, однією з цільових функцій може бути мінімізація капітальних витрат, а іншою — максимізація прибутковості інвестицій у ВДЕ. Завдяки встановленню вагових коефіцієнтів для цих функцій можна збалансувати економічні цілі, досягаючи оптимального співвідношення між витратами та вигодами.

2.1.3 Технічні критерії

Технічна надійність і ефективність енергетичних систем також мають першорядне значення. До ключових технічних показників належать стабільність постачання енергії, інтеграція нових потужностей ВДЕ в існуючу інфраструктуру та оптимізація використання ресурсів. Наприклад, для сонячної або вітрової енергетики важливим є врахування нерівномірності генерації енергії через природну змінність погодних умов.

Метод критеріального програмування дозволяє створювати моделі, які враховують баланс між виробництвом і споживанням енергії, визначення оптимального рівня запасів у системах зберігання енергії та інтеграцію ВДЕ в електромережу. Наприклад, цільова функція може забезпечувати максимізацію

коефіцієнта використання встановленої потужності, водночас враховуючи технічні обмеження мережевої інфраструктури.

Таким чином, інтеграція екологічних, економічних та технічних критеріїв за допомогою методу критеріального програмування дозволяє розв'язувати комплексні задачі, спрямовані на сталий розвиток енергетичної галузі.

2.2 Формалізація задачі

Задача багатокритеріальної оптимізації може бути записана у вигляді:

$$\sum_{i=1}^n \omega_i \cdot |f_i(x) - g_i| \rightarrow \min \quad (2.1)$$

де $f_i(x)$ — значення i -го критерію, g_i — цільове значення, ω_i — ваговий коефіцієнт. Ця функція компромісу мінімізує сумарне відхилення від цільових значень із врахуванням ваги кожного критерію.

Обмеження задачі формуються як рівняння або нерівності, які описують технічні, екологічні чи економічні вимоги до системи.

2.2.1 Приклад застосування

Розглянемо задачу оптимізації функціонування гібридної енергетичної системи, яка складається із сонячних панелей, вітрових турбін і батарей для зберігання енергії. Основними цілями є:

- Мінімізація витрат на встановлення й експлуатацію системи, включаючи капітальні та операційні витрати.
- Мінімізація викидів вуглекислого газу (CO_2), щоб знизити екологічний слід системи.
- Максимізація покриття попиту на електроенергію за рахунок ВДЕ, забезпечуючи стабільність і надійність енергопостачання.

Метод критеріального програмування використовується для створення функції компромісу. Ця функція враховує відхилення фактичних значень критеріїв від заданих цільових показників. Відхилення розділяють на позитивні

(перевищення цілі) та негативні (недосягнення цілі), що дозволяє формувати рішення, максимально наближене до ідеального.

2.2.2 Алгоритм реалізації

1. Збір даних:

- Для визначення початкових параметрів гібридної системи аналізуються:
- Потенціал відновлюваних джерел енергії (інтенсивність сонячного випромінювання, швидкість вітру).
- Профіль енергоспоживання регіону.
- Екологічні й економічні показники (вартість встановлення обладнання, рівень викидів).

2. Формування цільових функцій:

- Економічна цільова функція: f_1 = загальні витрати
- Екологічна цільова функція: f_2 = викиди CO₂
- Технічна цільова функція: f_3 = відсоток покриття попиту

3. Введення вагових коефіцієнтів:

Для кожного критерію визначаються вагові коефіцієнти (ω_1 , ω_2 , ω_3) залежно від їхньої пріоритетності. Наприклад, у проєкті, орієнтованому на зниження екологічного сліду, ваговий коефіцієнт для екологічної функції буде найвищим.

4. Створення функції компромісу:

Загальна функція виглядає як:

$$Z = \omega_1 \cdot d_1 + \omega_2 \cdot d_2 + \omega_3 \cdot d_3 \quad (2.2)$$

де d_1 , d_2 , d_3 — відхилення від цільових значень для кожного критерію.

5. Оптимізація:

Застосовуються чисельні методи оптимізації (наприклад, лінійне або нелінійне програмування), щоб знайти набір параметрів, який мінімізує функцію Z .

6. Результати:

Отримане рішення визначає оптимальну кількість сонячних панелей, вітрових турбін і батарей для зберігання енергії, а також їхнє розташування і режим роботи.

2.3 Переваги методу

Метод критеріального програмування демонструє суттєві переваги завдяки своїй універсальності, що забезпечує його застосування у різноманітних сценаріях енергетики. Гнучкість цього методу дозволяє налаштовувати модель під конкретні вимоги кожного проєкту, адаптуючи вагові коефіцієнти або обмеження для задоволення специфічних потреб. Здатність враховувати суперечливі інтереси забезпечує його компромісність, що критично важливо у багатокритеріальних задачах.

Серед переваг також виділяється відносна простота реалізації. Завдяки наявності ефективних числових алгоритмів, метод критеріального програмування дозволяє вирішувати задачі навіть у складних багатокомпонентних системах. Він підходить для автоматизованого моделювання, що зменшує часові витрати та ризик людських помилок.

Застосування цього підходу у сфері відновлюваних джерел енергії сприяє досягненню цілей сталого розвитку. Оптимізація систем енергетики дозволяє не лише мінімізувати екологічні ризики, а й підвищити економічну ефективність. Це створює основу для розробки стабільних, надійних та екологічно безпечних енергетичних рішень, які відповідають викликам сучасності.

2.4 Висновок

Критеріальне програмування сприяє зростанню адаптивності енергетичних систем і вдосконаленню процесів прийняття рішень. Це дозволяє ефективніше використовувати ресурси, враховуючи екологічні, економічні та

технічні аспекти, і підвищує конкурентоспроможність технологій ВДЕ у глобальному масштабі.

3 КРИТЕРІАЛЬНИЙ МЕТОД У ЗАБЕЗПЕЧЕННІ БАЛАНСУ ЕНЕРГІЇ В СИСТЕМАХ З ВДЕ

На сьогодні розвиток відновлюваних джерел енергії (ВДЕ) супроводжується значними викликами, пов'язаними з недостатньою готовністю електроенергетичної інфраструктури до інтеграції їхньої генерації. Чим більша частка ВДЕ в енергосистемах, тим частіше виникають технічні та фінансові проблеми, спричинені нерівномірністю їхньої роботи. Основною причиною цього є відсутність комплексного підходу, який передбачав би модернізацію електричних мереж та створення механізмів компенсації нестабільності графіків генерування, зокрема сонячних (ФЕС) і вітрових (ВЕС) установок.

Водночас ВДЕ вже стали невід'ємною складовою сучасних електроенергетичних систем (ЕЕС). Їх успішна інтеграція вимагає розробки рішень, спрямованих на забезпечення балансування потужності, підвищення надійності та ефективності енергопостачання. Нерівномірність генерації ВЕС і ФЕС обумовлює необхідність резервування потужностей через теплову генерацію, гідроакумулюючі станції чи інноваційні технології накопичення енергії, такі як хімічні батареї, водневі чи біогазові установки. Організаційні заходи, такі як узгодження графіків споживання й виробництва або тимчасове обмеження генерування з компенсацією, також відіграють важливу роль.

Ці виклики вимагають запровадження стратегій, які поєднують технічні, економічні та екологічні аспекти, зокрема застосування сучасних оптимізаційних методів для досягнення сталого розвитку енергетичних систем.

3.1 Системний підхід до компенсації коливань генерації ВДЕ

Оптимальний підхід до вирішення проблеми нестабільності генерації відновлюваних джерел енергії передбачає використання комплексних методів компенсації, які поєднують кілька різних способів. Такий підхід дозволяє мінімізувати загальні витрати V_{Σ} на резервування потужностей для забезпечення стабільності системи. Завдання оптимізації резервування формулюється як багатокритеріальна задача, що враховує екологічні, економічні та технічні параметри. Це забезпечує ефективний розподіл ресурсів і стабільну інтеграцію

ВДЕ в енергосистему, сприяючи досягненню балансової надійності та економічної ефективності [16]:

$$B_{\Sigma} = B_x(P_x) + B_{\theta}(P_{\theta}) + B_z(P_z) + B_c(P_c) + B_n(P_n) \rightarrow \min, \quad (3.1)$$

де $B_x(P_x)$ – витрати на резервування накопичувачами хімічного типу; $B_{\theta}(P_{\theta})$ – витрати на водневі технології; $B_z(P_z)$ – витрати, зв'язані з використанням біогазових технологій як резерву; $B_c(P_c)$ – витрати на користування системним резервом, це є фактично компенсація за утримання резерву на завантаження для енергоагрегатів ТЕС, що працюють за ціновими заявками і визначається за формулою:

$$B_c = \begin{cases} P_c \cdot (\theta_p^C - d\theta_n), \theta_p^C > d\theta_n & (зрн / год), \\ 0, \theta_p^C < d\theta_n \end{cases} \quad (3.2)$$

θ_p^C – гранична ціна електроенергетичної системи, що встановлюється для розрахункової години на оптовому ринку електроенергії;

$d\theta_n$ – приріст вартості палива, обчислюваний за допомогою похідної від функції витрат палива, залежно від рівня навантаження агрегату електростанції та вартості необхідного палива;

$B_n(P_n)$ – витрати, пов'язані з резервуванням пропускної спроможності ліній електропередачі;

$P_x, P_{\theta}, P_z, P_c, P_n$ – оптимальні значення потужностей, розраховані для кожного методу резервування відповідно.

За даними 2021–2023 років, потреба України в резервуванні електроенергії за допомогою батарейних систем накопичення становила 1500 МВт [17]. Витрати на резервування із застосуванням накопичувачів хімічного типу охоплюють витрати на їх встановлення та обслуговування:

$$B_x(P_x) = e_{P_x}^{num} \cdot P_x,$$

$e_{P_x}^{num}$ – питомі витрати на накопичувач певної ємності, грн./кВт·год.

Ці витрати суттєво залежать від типу накопичувача і зазначені в таблиці 6.1 за даними [18].

До витрат, пов'язаних із використанням хімічних накопичувачів, необхідно враховувати вартість палива, тобто витрати на електроенергію для зарядки та технічного обслуговування. Ціна літій-іонних акумуляторів для транспортних засобів знизилася на 73% у період 2010–2016 років. Стационарні акумулятори мають вищу вартість встановлення через складніші режими заряду/розряду, що вимагають удосконалених систем керування та обладнання. У Німеччині вартість невеликих літій-іонних акумуляторів знизилася на 60% між 2014 і 2017 роками. Очікується, що до 2030 року їх ціна зменшиться ще на 54–61% завдяки масштабуванню виробництва.

Таблиця 3.1 Вартість електроенергії (палива для хімічних накопичувачів) на прикладі АТ «Вінницяобленерго»

Прогнозована ціна закупівлі електричної енергії на ринках електричної енергії, без ПДВ грн./МВт·год:			
1 764,70			
Тариф на послуги з передачі електричної енергії ПРАТ «НЕК «УКРЕНЕРГО», без ПДВ грн/МВт·год:			
293,93			
Тариф на розподіл електричної енергії, без ПДВ грн/МВт·год			
АТ «Вінницяобленерго» (Постанова НКРЕКП №2362 від 09.12.2020р.):		АТ «Укрзалізниця» (Постанова НКРЕКП № 2361 від 09.12.2020р.):	
1 клас	167,14	1 клас	192,82
2 клас	1150,40	2 клас	907,44
Тариф на послуги постачальника універсальних послуг, без ПДВ грн/МВт·год:			
105,32			
Ціна на універсальні послуги для малих побутових споживачів, електроустановки яких приєднані до електричних мереж АТ «Вінницяобленерго» згідно з класом напруги, без ПДВ грн/МВт·год		Ціна на універсальні послуги для малих побутових споживачів, електроустановки яких приєднані до електричних мереж АТ «Укрзалізниця» згідно з класом напруги, без ПДВ грн/МВт·год	
1 клас	2 331,09	1 клас	2356,77
2 клас	3 314,35	2 клас	3071,39

Це демонструє потенційне зниження загальної вартості літій-іонних батарей для стаціонарного використання до 145 доларів США за кВт·год і 480 доларів США за кВт·год, залежно від хімічних характеристик акумулятора (рис. 3.1).

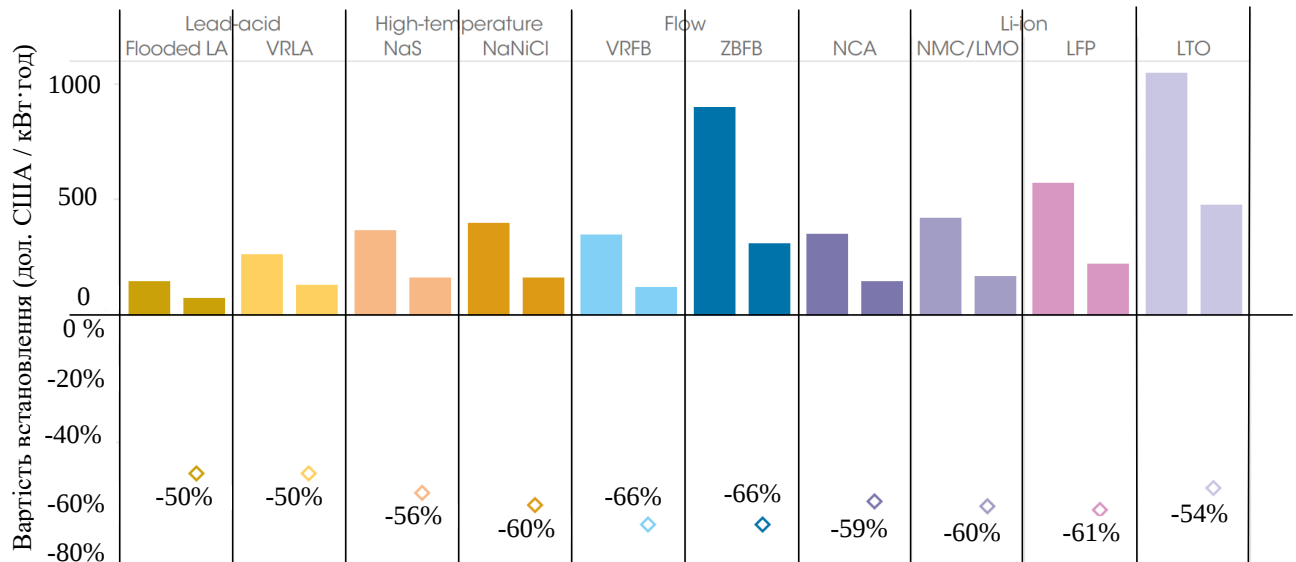


Рисунок 3.1. Прогнозування зменшення вартості встановлення акумуляторної система зберігання електроенергії, 2016-2030 рр. [17]:

На рисунку 3.1 представлені такі типи акумуляторних батарей:

- LA (Lead-Acid) – свинцево-кислотна акумуляторна батарея.
- VRLA (Valve-Regulated Lead-Acid) – свинцево-кислотна батарея з регульованим клапаном.
- NaS (Sodium Sulphur) – натрієво-сірчана батарея.
- NaNiCl (Sodium Nickel Chloride) – натрієво-хлоридно-нікелева батарея.
- VRFB (Vanadium Redox Flow Battery) – ванадієва окислювально-відновна батарея.
- ZBFB (Zinc Bromine Flow Battery) – цинково-бромовна батарея.
- NCA (Nickel Cobalt Aluminum) – нікель-кобальт-алюмінієва батарея.

- NMC/LMO (Nickel Manganese Cobalt Oxide/Lithium Manganese Oxide) – нікель-марганець-кобальт-оксидна або літій-марганцева батарея.
- LFP (Lithium Iron Phosphate) – літій-залізо-фосфатна батарея.
- LTO (Lithium Titanate) – літієво-титанатна батарея.

Витрати на водневі технології:

$$B_{\epsilon}(P_{\epsilon}) = \epsilon_{P_{\epsilon}}^{num.} \cdot P_{\epsilon}, \quad (3.4)$$

$\epsilon_{P_{\epsilon}}^{num.}$ – питомі витрати на водневі технології, 800 \$/кВт·год;

За даними джерела [19], на формування витрат на генерування електроенергії за допомогою біогазових установок впливають тип сировини та відстань до її бази. Економічно доцільними є відстані до 20 км для рідкої сировини та до 50 км для сухої. Вартість 1 кВт встановленої потужності значною мірою залежить від розміру проекту та типу сировини; чим більший проект, тим нижчі витрати, в середньому становлячи 1500 € за 1 кВт потужності. Витрати, пов'язані з використанням біогазових технологій як резерву, визначаються за наступною формулою:

$$B_{\epsilon}(P_{\epsilon}) = \epsilon_{P_{\epsilon}}^{num.} \cdot P_{\epsilon} \quad (3.5)$$

$\epsilon_{P_{\epsilon}}^{num.}$ – питомі витрати на біогазові технології.

Витрати на використання системного резерву визначаються як:

$$B_c(P_c) = \epsilon_{P_c}^{num.} \cdot P_c \quad (3.6)$$

$\epsilon_{P_c}^{num.}$ – питомі витрати на користування системним резервом.

Оскільки використання будь-якого способу резервування генерації ВДЕ змінює розподіл потоків потужності через лінії електропередачі, існує ризик

недостатньої пропускної здатності окремих ділянок мережі. У таких випадках необхідно врахувати витрати на модернізацію та збільшення пропускної здатності електричних мереж:

$$B_n(P_n) = e_{P_n}^{num.} \cdot P_n \quad (3.7)$$

$e_{P_n}^{num.}$ – питомі витрати по підтриманню запасу по пропускній спроможності ЛЕП; $P_n = P_x + P_\epsilon + P_\zeta$.

Якщо оптимізація витрат на способи компенсації відхилень у графіках генерації ВДЕ від заявлених показників здійснюється методом критеріального програмування, результатом є визначення критеріїв подібності. Ці критерії виступають ваговими коефіцієнтами окремих складових у загальних витратах B_Σ [16]. Для задачі (3.1) критерії подібності розраховуються за допомогою методу інтегральних аналогів, при цьому вони нормуються до одиничного значення:

$$\pi_x + \pi_\epsilon + \pi_\zeta + \pi_c + \pi_n = 1 \quad (3.8)$$

де $\pi_i = \frac{B_i(P_i)}{B_\Sigma}$ – критерії подібності (вагові коефіцієнти) відповідно до

витрат на способи компенсації нестабільності генерування ВДЕ.

Оптимізаційні результати, представлені у такому форматі, забезпечують глибокий аналіз пропорційності та чутливості компонентів цільової функції, зокрема способів компенсації нестабільності генерації ВДЕ [20, 21, 22, 23]. Аналіз пропорційності дозволяє визначити раціональний порядок способів компенсації за витратами, що сприяє стратегічному плануванню інвестицій і ресурсів. Вивчення чутливості забезпечує розуміння ефективності кожного способу, дозволяючи обґрунтовано розподіляти та адаптувати використання доступних потужностей залежно від умов експлуатації, підвищуючи ефективність і надійність енергетичної системи.

3.2 Критеріальна модель питомих витрат на резервування при використанні хімічних накопичувачів

Модифікована математична модель розрахунку питомих витрат резервування потужності на 1 кВт у разі застосування хімічних накопичувачів враховує специфіку системи, яка потребує резервування. Вона включає адаптовані параметри для врахування технологічних обмежень, витрат на встановлення, експлуатацію й заряджання накопичувачів, а також враховує ефекти масштабування. Такий підхід дозволяє точно визначити економічно доцільний сценарій інтеграції накопичувачів у систему, з урахуванням змінних витрат та адаптації до навантажень, забезпечуючи баланс між надійністю та ефективністю енергозабезпечення:

$$B = \frac{C_1}{P_x} + C_2 P_c + C_3 P_n + C_4 \frac{P_x^2}{P_c^{-2} \cdot P_n} \quad (3.9)$$

де C_1, C_2, C_3, C_4 — узагальнені константи, які містять вихідні дані задачі, що розв'язується.

Модифіковане рівняння включає кілька складових. Перша частина моделі відображає питомі витрати на реалізацію резервування із застосуванням хімічних накопичувачів електроенергії, що враховують вартість їхньої установки, зарядки та експлуатації. Друга, третя і четверта складові стосуються витрат на модернізацію і адаптацію електричних мереж для забезпечення резервування, включаючи підвищення пропускної здатності та втрати енергії. Запропонована модель відповідає принципу канонічності, оскільки кількість змінних та рівнянь дотримується умови $m=n+1$, що забезпечує математичну коректність і точність розрахунків.

Ортонормована система рівнянь для (3.9) запишеться:

$$\begin{cases} -\pi_1 + 2\pi_4 = 0; \\ \pi_2 - 2\pi_4 = 0; \\ \pi_3 - \pi_4 = 0; \\ \pi_1 + \pi_2 + \pi_3 + \pi_4 = 1, \end{cases} \quad (3.10)$$

У матричній формі:

$$\begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 & 2 \\ 0 & 1 & 0 & -2 \\ 0 & 0 & 1 & -1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \pi_1 \\ \pi_2 \\ \pi_3 \\ \pi_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (3.11)$$

Розв'язки цієї системи виглядають наступним чином: $\pi_1 = \pi_2 = \frac{2}{6}$; $\pi_3 = \pi_4 = \frac{1}{6}$. Це означає, що вагові коефіцієнти для витрат на хімічні накопичувачі та системний резерв є рівноцінними, що вказує на однакову економічну доцільність цих двох способів резервування. Оптимальний розподіл ресурсів передбачає, що витрати на вдосконалення пропускної здатності електричних мереж становитимуть половину від витрат, необхідних для реалізації одного з цих способів резервування. Такий підхід забезпечує збалансованість у фінансуванні різних аспектів резервування, сприяючи ефективному функціонуванню енергетичної системи з мінімізацією загальних витрат.

Економічно оптимальні значення потужностей P_x , P_c і P_n визначаються з наступної системи рівнянь:

$$\left\{ \begin{array}{l} \pi_1 = \frac{2}{6} = \frac{C_1}{P_{x o}}; \\ \pi_2 = \frac{2}{6} = C_2 \cdot P_{c o}; \\ \pi_3 = \frac{1}{6} = C_3 \cdot P_{n o}; \\ \pi_4 = \frac{1}{6} = \frac{C_4 \cdot P_{x o}^2}{P_{c o}^{-2} \cdot P_{n o}}, \end{array} \right. \quad (3.12)$$

де $P_{x o}$ – оптимальне значення потужності хімічних накопичувачів;

$P_{c o}$ – оптимальне значення потужності системного резерву;

$P_{n o}$ – оптимальне значення потужності пропускної здатності ЛЕП.

Розв’язки цієї системи рівнянь:

$$\begin{aligned} P_{x o} &= \left(\frac{C_1^4}{4C_2^2 \cdot C_3 \cdot C_4} \right)^{\frac{1}{6}}; \\ P_{c o} &= \left(\frac{4C_1^2 \cdot C_3 \cdot C_4}{C_2^4} \right)^{\frac{1}{6}}; \\ P_{n o} &= \left(\frac{C_1^2 \cdot C_2^2 \cdot C_4}{16 \cdot C_2^5} \right)^{\frac{1}{6}}; \\ B_o &= 3 \left(4 \cdot C_1^2 \cdot C_2^2 \cdot C_3 \cdot C_4 \right)^{\frac{1}{6}}. \end{aligned} \quad (3.13)$$

Можемо записати сумарні витрати у критеріальній формі:

$$B_* = \frac{\pi_1}{P_{x*}} + \pi_2 P_{c*} + \pi_3 P_{n*} + \pi_4 \frac{P_{x*}^2}{P_{c*}^{-2} \cdot P_{n*}}, \quad (3.14)$$

де $B_* = B/B_o$; $P_{i*} = P_i/P_{i o}$.

Підставивши числові значення:

$$B_* = \frac{2}{6P_{x^*}} + \frac{2P_{c^*}}{6} + \frac{P_{n^*}}{6} + \frac{P_{x^*}^2}{6P_{c^*}^2 \cdot P_{n^*}} \quad (3.15)$$

Розглянемо окремо складові витрат, пов'язані з резервуванням електроенергії за допомогою хімічних накопичувачів (перший компонент) та витратами, що охоплюють користування системним резервом і модернізацію електричних мереж для збільшення їхньої пропускної здатності (другий компонент). Такий підхід дозволяє детально проаналізувати різні аспекти витрат та визначити оптимальні шляхи їх розподілу, враховуючи технічні характеристики і економічну ефективність кожного способу резервування.

$$B_* = 0,333 \cdot P_{x^*}^{-1} + 0,667 \cdot (0,5 \cdot P_{c^*} + 0,25 \cdot P_{n^*} + 0,25 \cdot P_{x^*}^2 \cdot P_{c^*}^{-2} \cdot P_{n^*}). \quad (3.16)$$

Економічна доцільність співвідношень складових моделі (3.9) не залежить від параметрів $C_1, \dots, C_4$. Згідно з прийнятою моделлю (3.15), загальні витрати B_Σ на компенсацію нестабільності генерування ВДЕ будуть оптимальними, якщо $2/3$ витрат спрямовувати на модернізацію електромереж та використання системного резерву, а $1/3$ — на хімічні накопичувачі.

Модель також визначає, що частка витрат на пропускну спроможність ліній становить $0,25$, а на системний резерв — $0,5$. Вирази (3.13) демонструють, що економічно доцільні значення потужностей і витрат залежать від сценарію реалізації резервування та взаємозв'язків у системі. Це дозволяє оцінити чутливість витрат до змін у потужностях і обрати оптимальні способи резервування. У разі фіксації базових значень констант $C_1, \dots, C_4$ вирази (3.13) набувають відповідного уточненого вигляду:

$$P_{x o^*} = \left(\frac{C_{1^*}^4}{4C_{2^*}^2 \cdot C_{3^*} \cdot C_{4^*}} \right)^{\frac{1}{6}};$$

$$P_{c o^*} = \left(\frac{4C_{1^*}^2 \cdot C_{3^*} \cdot C_{4^*}}{C_{2^*}^4} \right)^{\frac{1}{6}}; \quad (3.17)$$

$$P_{n o^*} = \left(\frac{C_{1^*}^2 \cdot C_{2^*}^2 \cdot C_{4^*}}{16 \cdot C_{2^*}^5} \right)^{\frac{1}{6}};$$

$$B_{o^*} = 3 \left(4 \cdot C_{1^*}^2 \cdot C_{2^*}^2 \cdot C_{3^*} \cdot C_{4^*} \right)^{\frac{1}{6}}.$$

$$\text{де } C_{i^*} = \frac{C_i}{C_{i0}}, \quad i = \overline{1,4}.$$

З виразів (3.17) можна оцінити, як зміна параметра впливає на економічно доцільні значення всіх змінних у виразі (3.16). Наприклад, якщо значення параметра збільшиться втричі відносно базисного, а інші залишатимуться сталими, то сумарні витрати на компенсацію нестабільності ВДЕ зростуть на 44,2 %, потужність хімічних накопичувачів збільшиться вдвічі, а також зросте потужність пропускної спроможності ліній та системного резерву на 44,2 %.

Вибір складу потужностей для резервування повинен враховувати технічні обмеження, які можуть призвести до збільшення витрат. Крім того, критеріальне рівняння (3.16) дозволяє визначити зміни питомих витрат при зміні потужностей, що оптимізуються, а також оцінити чутливість витрат до змін. Наприклад, якщо потужність хімічних накопичувачів збільшиться на 50 %, витрати зростуть на 9,7 %, а при подвоєнні потужності — на 33 %. Якщо потужність системного резерву збільшиться на 50 %, витрати зростуть на 7,4 %, а для ліній електропередач — на 2,8 %. Цей аналіз показує, що витрати найбільш чутливі до вибору потужності хімічних накопичувачів та системного резерву. На рис. 3.2 показано аналіз чутливості питомих витрат до зміни одного з факторів при незмінних інших.

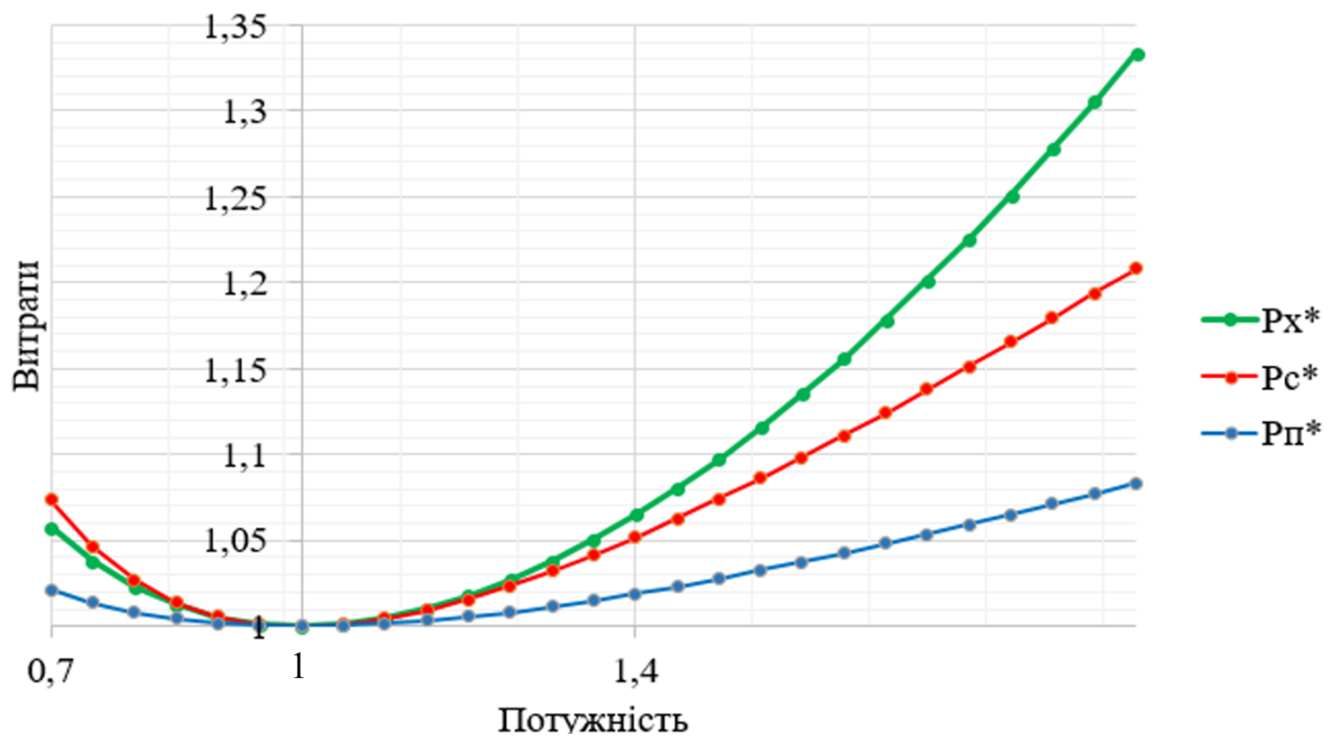
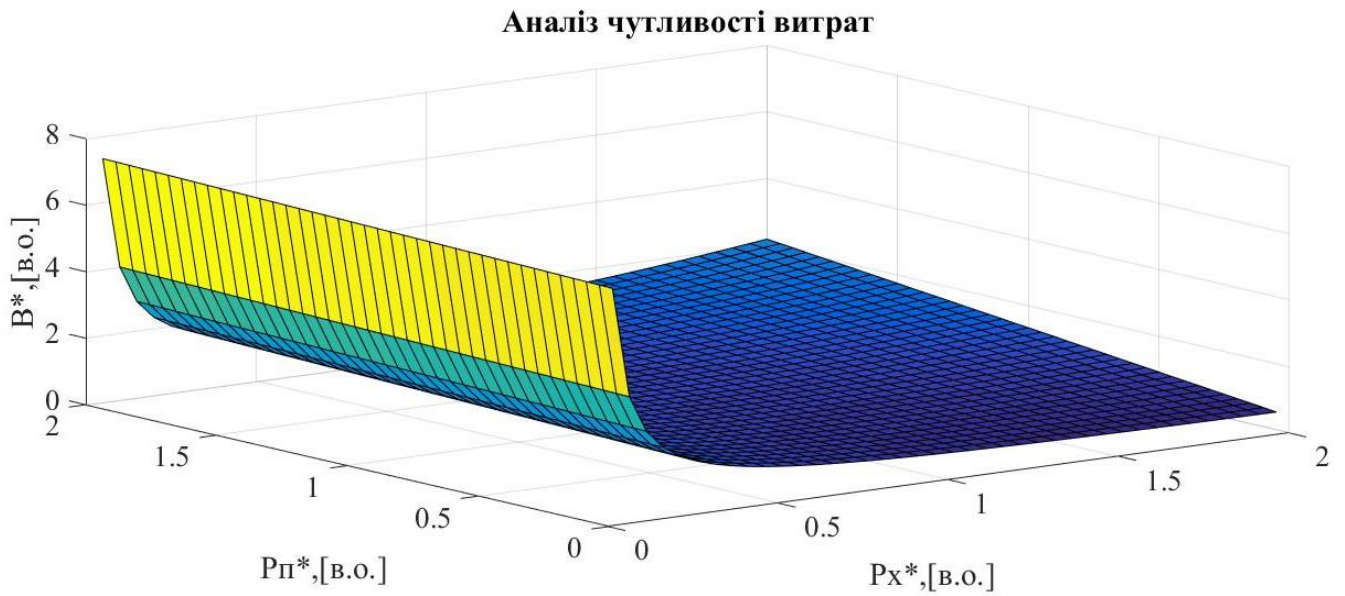
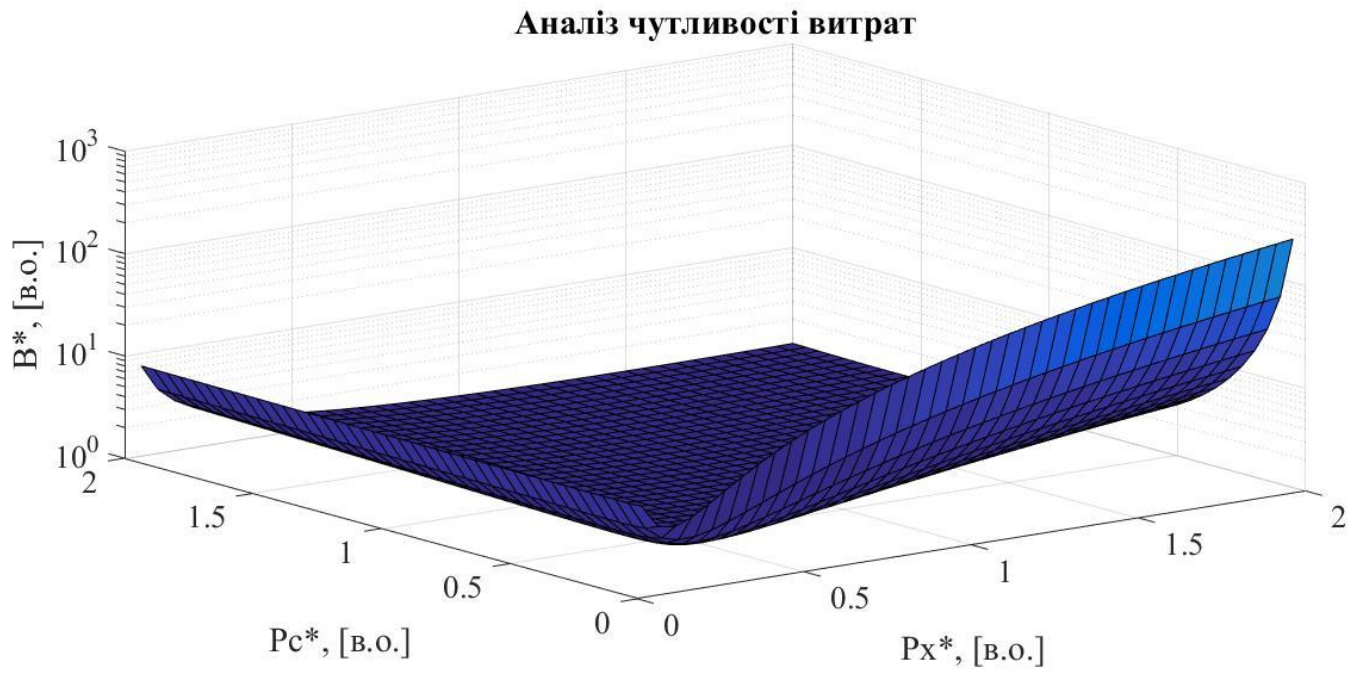


Рисунок 3.2 — Чутливість витрат: до зміни потужності накопичувачів хімічного типу (зелена крива); до зміни потужності системного резерву (червона крива) та до зміни потужності пропускної спроможності ліній електропередачі (синя крива).

На рисунку 3.3 показано, як зміна потужності накопичувачів хімічного типу одночасно з варіацією потужності системного резерву впливає на витрати. У цьому випадку потужність накопичувачів зменшується пропорційно збільшенню потужності системного резерву. Рисунок 3.4 демонструє чутливість витрат до змін у пропускній здатності ліній електропередачі та потужності накопичувачів хімічного типу. Взаємний вплив змін пропускної здатності ЛЕП і потужності системного резерву представлений на рис. 3.5.



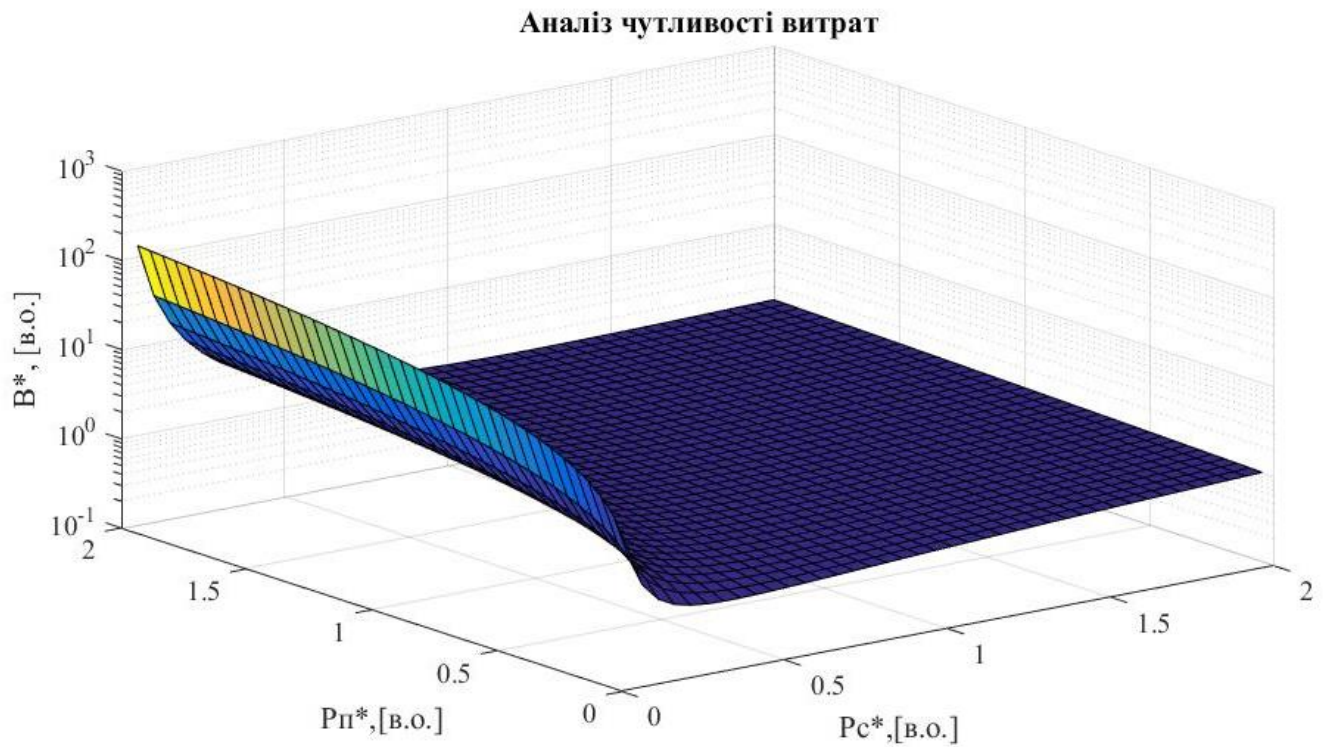


Рисунок 3.5 — Чутливість витрат до одночасної зміни пропускної здатності ЛЕП та потужності системного резерву.

Тому важливим є дослідження чутливості витрат на компенсацію нестабільності генерування ВДЕ через резервування потужності стосовно зміни оптимальних значень потужностей, що визначаються для кожного способу резервування. Це питання вимагає глибокого аналізу для з'ясування впливу змін параметрів на загальні витрати і ефективність різних способів резервування, що дозволить знайти найбільш економічно доцільні варіанти для забезпечення стабільності енергосистеми.

3.3 Критеріальна модель питомих витрат на резервування за сценарієм при використанні хімічних накопичувачів і біогазових установок

Збільшення системного резерву можливе лише за рахунок генерування на теплових електростанціях, що суперечить політиці декарбонізації. Зміна пропускної здатності ліній електропередачі через реконструкцію існуючих мереж (наприклад, перехід на вищий клас напруги) є економічно недоцільною через тривалий строк окупності, а будівництво нових ліній є ще дорожчим. Тому

доцільно розглянути варіант використання хімічних накопичувачів електроенергії та біогазових установок для компенсації нестабільності генерування ВДЕ з урахуванням обмежень пропускної здатності ЛЕП і можливостей системного резерву [16]:

$$B = \left[(b_1 + b_2 P_x + b_3 P_c) \cdot P_n + b_4 \left(\frac{P_c}{P_x} \right)^2 \cdot \frac{P_n}{P_c} \right] + \left[b_5 + b_6 P_c + b_7 P_c P_x + b_8 P_x P_n + b_9 \frac{P_c P_n}{P_x} \right], \quad (3.18)$$

де b_1 - b_9 – узагальнені константи, що містять вихідні дані вирішуваної задачі.

Розглянемо випадок, у якому оптимізуються потужності хімічних накопичувачів і біогазових установок. Значення цих змінних будуть визначені за допомогою критеріального методу. Для цього виокремлено змінні компоненти і введено відповідні припущення:

$$\begin{aligned} C_1 &= b_2 P_n + b_7 P_c + b_8 P_n; \\ C_2 &= b_9 P_c P_n; \\ C_3 &= b_9 P_c^2 P_n; \\ C_4 &= b_3 P_n. \end{aligned} \quad (3.19)$$

Запишемо (3.18) з урахуванням (3.19):

$$B = C_1 P_x + C_2 P_x^{-1} + C_3 P_x^{-2} P_c^{-1} + C_4 P_c \rightarrow \min \quad (3.20)$$

Оберемо мінімальне значення змінної складової витрат і відповідні оптимальні значення потужностей, що визначаються для кожного способу резервування – P_x та P_c , а також вектори критеріїв подібності π . Ступінь складності задачі дорівнює одиниці. Враховуючи умови ортогональності та

нормування, систему рівнянь для критеріїв подібності можна представити у вигляді:

$$\begin{cases} \pi_1 - \pi_2 - 2\pi_3 = 0; \\ -\pi_3 + \pi_4 = 0; \\ \pi_1 + \pi_2 + \pi_3 + \pi_4 = 1. \end{cases} \quad (3.21)$$

В системі рівнянь (3.21) критерії подібності можуть бути визначені тільки через один з них – базисний. Перетворимо матрицю α в α' перестановкою другого та четвертого стовпця матриці α :

$$\alpha = \begin{bmatrix} 1 & -1 & -2 & -1 \\ 0 & 0 & -1 & 1 \end{bmatrix} \Rightarrow \alpha' = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -2 & -1 \\ 0 & 1 & -2 & 0 \end{bmatrix}. \quad (3.22)$$

Матриця β , що складається з векторів нормалізації та нев'язки записується у вигляді:

$$\beta = \begin{bmatrix} 2 & 1 \\ 1 & 0 \\ 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

Щоб відновити правильний порядок індексації π , який був змінений через перестановку другого та четвертого стовпців матриці α , необхідно поміняти місцями другий та четвертий рядки матриці β :

$$\beta = \begin{bmatrix} 2 & 1 \\ 0 & 1 \\ 1 & 0 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}.$$

Вектори нормалізації β_0 і нев'язки β_1 визначаються як:

$$\beta_0 = \begin{bmatrix} 2 \\ 0 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix} \cdot \frac{1}{4};$$

$$\beta_1 = \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} - 2 \cdot \begin{bmatrix} \frac{1}{2} \\ 0 \\ \frac{1}{4} \\ \frac{1}{4} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ -\frac{1}{2} \\ -\frac{1}{2} \end{bmatrix}.$$

Базисною в термінах критеріального методу є змінна π_2 , яка є ваговим коефіцієнтом другого члена рівняння (3.20). З урахуванням цього вираз для вектора критеріїв подібності запишеться у вигляді:

$$\pi = \beta_0 + \beta_1 \pi_2. \quad (3.22)$$

Таким чином вектор критеріїв подібності в загальному випадку запишеться:

$$\pi = \begin{bmatrix} \frac{1}{2} \\ \pi_2 \\ \frac{1}{4} - \frac{1}{2} \pi_2 \\ \frac{1}{4} - \frac{1}{2} \pi_2 \end{bmatrix}.$$

Визначимо максимізуючий вектор π [24]:

$$\left(\frac{1}{2}\right)^0 \pi_2^1 \left(\frac{1}{4} - \frac{1}{2} \pi_2\right)^{-\frac{1}{2}} \left(\frac{1}{4} - \frac{1}{2} \pi_2\right)^{-\frac{1}{2}} = C_1^0 C_2^1 C_3^{-1/2} C_4^{-1/2}.$$

Розв'язавши його відносно π_2 отримаємо:

$$\pi_2 = \frac{C_2}{4C_3^{1/2} C_4^{1/2} + 2C_2}.$$

Підставивши у цей вираз значення коефіцієнтів С, отримаємо:

$$\pi_2 = \frac{b_9}{4b_3^{1/2} b_4^{1/2} + 2b_9}.$$

З урахуванням отриманого значення базисної змінної π_2 оптимальний вектор π_o запишеться у вигляді:

$$\pi_o = \begin{bmatrix} \frac{1}{2} \\ b_9 \\ \frac{b_9}{4(b_3 b_4)^{1/4} + 2b_9} \\ \frac{(b_3 b_4)^{1/2}}{4(b_3 b_4)^{1/4} + 2b_9} \\ \frac{(b_3 b_4)^{1/2}}{4(b_3 b_4)^{1/4} + 2b_9} \end{bmatrix}. \quad (3.23)$$

Для визначення мінімального значення втрат використовуємо вираз:

$$B_{min} = \left(\frac{C_1}{\pi_{1o}}\right)^{\pi_{1o}} \left(\frac{C_1}{\pi_{2o}}\right)^{\pi_{2o}} \left(\frac{C_1}{\pi_{3o}}\right)^{\pi_{3o}} \left(\frac{C_1}{\pi_{4o}}\right)^{\pi_{4o}}.$$

Враховуючи вирази (3.19) та (3.21), маємо:

$$B_{\min} = 2 \left((b_7 P_c + (b_2 + b_8) P_n) P_n P_c \left(2(b_3 b_4)^{\frac{1}{2}} + b_9 \right) \right)^{\frac{1}{2}} \quad (3.24)$$

Використовуючи наступне співвідношення, знаходимо оптимальне значення потужності хімічних накопичувачів:

$$\pi_{10} B_{\min} = (b_2 P_n + b_7 P_c + b_8 P_n) P_{xo}.$$

Після відповідних перетворень:

$$P_{xo} = \left[\frac{(2\sqrt{b_3 b_4} + b_9)}{b_7 P_c + (b_2 + b_8) P_n} \right]^{\frac{1}{2}}. \quad (3.25)$$

Для визначення оптимального значення потужності біогазових установок використаємо вираз:

$$\pi_{40} \cdot B_{\min} = b_3 P_n P_{zo}.$$

Після відповідних перетворень:

$$P_{zo} = \left[\frac{b_4 P_c}{b_3} \cdot \frac{b_7 P_c + (b_2 + b_8) P_n}{P_n (2\sqrt{b_3 b_4} + b_9)} \right]^{\frac{1}{2}}. \quad (3.26)$$

Для аналізу оптимального рішення на економічну стійкість використовуємо критеріальну модель, яка для даної задачі виглядає наступним чином:

$$B_* = \pi_1 P_{x*} + \pi_2 P_{x*}^{-1} + \pi_3 P_{x*}^{-2} P_{c*}^{-1} + \pi_4 P_{c*}, \quad (3.27)$$

Для побудови критеріальної моделі необхідно визначити складові вектора критеріїв подібності. Як видно з рівняння (3.23), ці критерії залежать виключно від коефіцієнтів b_3 , b_4 і b_9 . Отже, для оцінки оптимального рішення достатньо проаналізувати саме ці параметри.

Коефіцієнти b_1 - b_9 характеризують особливості енергетичної системи (ЕЕС), для якої планується компенсація нестабільності генерування. Вони залежать від ряду факторів, таких як питома вартість встановленої потужності резервування, особливості обраного способу компенсації, витрати на використання системного резерву та інші параметри, що враховують технічні й економічні характеристики системи. Дослідження цих факторів дозволяє більш точно моделювати процес резервування і забезпечувати ефективність компенсації.

Для прикладу розглянемо сценарій, який характеризується наступними значеннями відповідних коефіцієнтів: $b_1=0.3$; $b_2=0.03$; $b_3=10 \cdot 10^{-3}$; $b_4=5 \cdot 10^{-3}$; $b_5=20$; $b_6=0.8 \cdot 10^{-3}$; $b_7=5 \cdot 10^{-3}$; $b_8=0.03$; $b_9=5.6 \cdot 10^{-3}$. Для таких даних визначимо оптимальні значення потужностей хімічних накопичувачів та біогазових установок за наступними формулами:

$$P_{xo} = 9,94 \cdot \sqrt{\frac{P_n \cdot P_c}{300 \cdot P_n + 25 \cdot P_c}};$$

$$P_{co} = 0,04 \cdot \sqrt{300 \cdot P_n + \frac{25 \cdot P_c^2}{P_n}}.$$

Підставивши обрані значення b_1 - b_9 в (3.22), отримаємо наступні значення критеріїв подібності:

$$\pi = \begin{bmatrix} 0,5 \\ 0,142 \\ 0,179 \\ 0,179 \end{bmatrix}.$$

В такому випадку критеріальна модель (3.27) набуде вигляду:

$$B_* = 0,5P_{x^*} + 0,142P_{x^*}^{-1} + 0,179P_{x^*}^{-2}P_{e^*}^{-1} + 0,179P_{e^*}. \quad (3.28)$$

Запропонована модель є ефективним інструментом для аналізу чутливості витрат до змін у потужності хімічних накопичувачів (рис. 3.6) та біогазових установок (рис. 3.7) [20, 25]. З рівнянь (3.25) і (3.26) випливає, що оптимальні значення потужностей і пов'язані з ними витрати залежать від сценарію резервування, враховуючи використання системного резерву та пропускної здатності ліній електропередачі. Це дозволяє визначати економічно доцільні способи компенсації та їх потужності, беручи до уваги взаємодію елементів системи.

Крім того, модель дозволяє оцінювати вплив початкових параметрів на результати, що дає змогу адаптувати сценарії резервування під реальні умови. Аналіз виразу (3.28) допомагає дослідити чутливість витрат до змін потужностей та виявити, які параметри мають найбільший вплив на загальні витрати [26, 27].

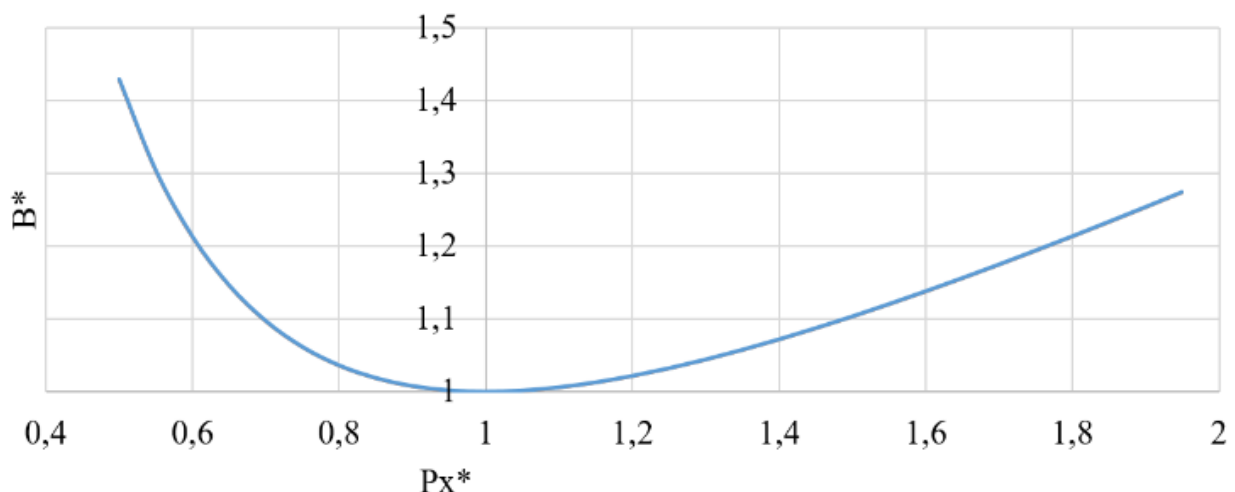


Рисунок 3.6 — Чутливість витрат до зміни потужності хімічних накопичувачів

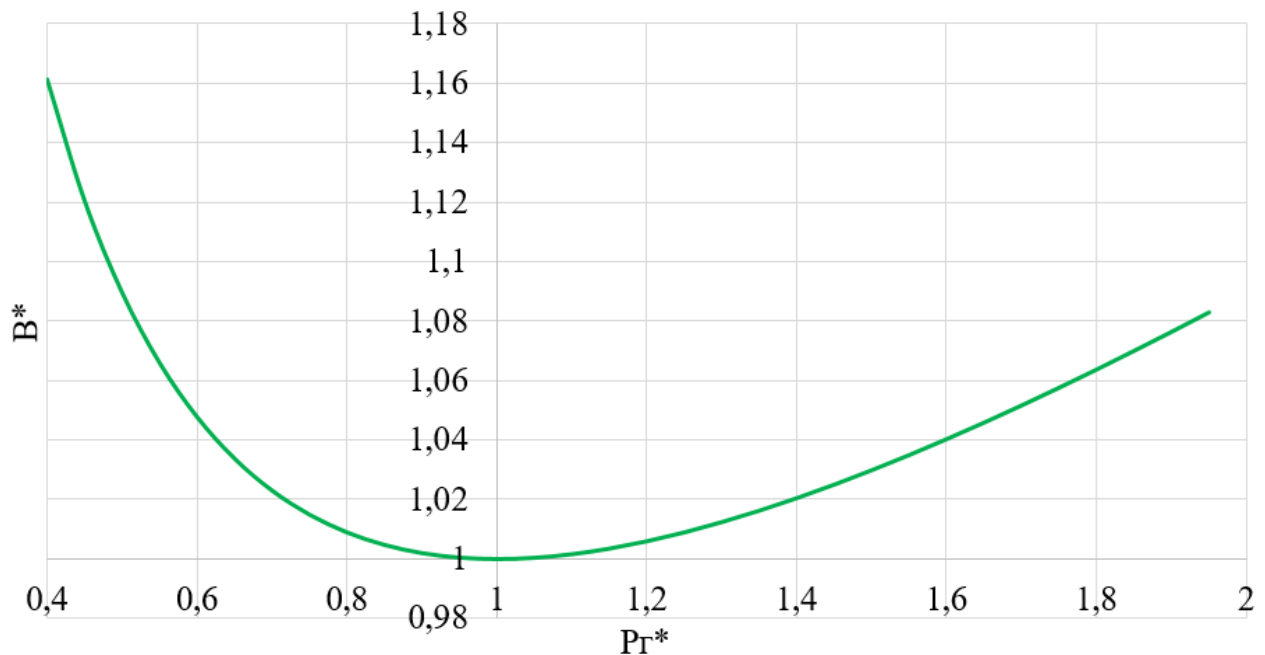


Рисунок 3.7 — Чутливість витрат до зміни потужності біогазових установок

3.4 Практичне застосування способі компенсації нестабільності генерування генерованої ВДЕ електроенергії

3.4.1 Визначення допустимих відхилень параметрів

У реальних умовах експлуатації електроенергетичної системи з ВДЕ можливі зміни параметрів резервування через технічні, економічні чи інші обмеження. Відхилення параметрів від оптимальних значень може призвести до зростання витрат, що особливо важливо враховувати в довгострокових планах. Аналіз чутливості витрат дозволяє оцінити вплив таких змін і допомагає у прийнятті рішень щодо адаптації потужностей резервування до реальних умов експлуатації.

У процесі визначення оптимального складу потужностей резервування обчислюються їхні значення для кожного способу, які мінімізують загальні витрати B_{Σ} на компенсацію нестабільності генерації ВДЕ. Значення параметрів P_i знаходяться шляхом оптимізації витрат і можуть відрізнятися від реальних

параметрів системи, що функціонує в умовах нестабільного генераторного середовища.

Такі відхилення впливають не лише на ефективність, але й на економічні показники системи. Показник якості функціонування системи резервування залежить від сукупності параметрів $P_1, \dots, P_m$, що в цій задачі є контрольованими змінними. Оптимальні значення $P_{1o}, \dots, P_{mo}$ відповідають мінімальному значенню витрат B_Σ , яке забезпечує найбільш ефективне використання ресурсів:

$$B_o = B(P_{1o}, \dots, P_{mo}). \quad (3.29)$$

У реальних електроенергетичних системах значення параметрів P_{io} , які визначаються для кожного способу резервування, можуть відхилятися від оптимальних через низку технологічних та економічних обмежень. До таких обмежень належать пропускна здатність ліній електропередачі, технічна можливість встановлення потужностей, а також їх місце розташування. Відхилення параметрів можна описати як $\Delta P_1, \dots, \Delta P_m$, що відображає різницю між реальними та оптимальними значеннями. Ці відхилення можуть впливати на ефективність і витрати системи резервування, що вимагає додаткового аналізу для зменшення впливу обмежень. При цьому:

$$B_\Sigma = B(P_{1o} + \Delta P_1, \dots, P_{mo} + \Delta P_m), \quad (3.30)$$

З вищевказаного виразу слідує, що значення сумарних витрат B_Σ на компенсацію нестабільності генерування ВДЕ зміниться на:

$$\Delta B = B(P_{1o} + \Delta P_1, \dots, P_{mo} + \Delta P_m) - B_o. \quad (3.31)$$

Оскільки відхилення параметрів від оптимальних значень є неминучим, це призводить до варіації витрат ΔB . Для забезпечення ефективності функціонування системи резервування визначаються допустимі межі зміни

сумарних витрат B або їх варіації ΔB . Система вважається працездатною, якщо зміни витрат не перевищують встановлених допустимих меж. Це дозволяє зберігати економічну доцільність і стабільність функціонування системи, враховуючи вплив технологічних, економічних та інших факторів. Отже, система є працездатною за умови:

$$B(P_1, \dots, P_m) \in \mathbf{M}_B \quad (3.32)$$

або

$$\Delta B(\Delta P_1, \dots, \Delta P_m) \in \Delta \mathbf{M}_B, \quad (3.33)$$

де $\mathbf{M}_B$ і $\Delta \mathbf{M}_B$ – відповідно допустимі множини (області) значень сумарних витрат B_Σ на компенсацію нестабільності генерування ВДЕ B і його варіації ΔB .

Множини $\mathbf{M}_B$ і $\Delta \mathbf{M}_B$ визначають допустимі значення сумарних витрат B на компенсацію нестабільності генерації ВДЕ та їх варіації ΔB . Вони задають допустимі межі параметрів, які забезпечують якісне функціонування системи резервування.

Допуски включають верхню P^+ та нижню P^- межі відхилення від оптимальних значень, ширину допуску δP , координату середини P_{cp} та половину допуску δP_{cp} . Зв'язки між цими характеристиками можна представити аналітичними співвідношеннями, ілюстрованими на рис. 3.8.

$$\begin{aligned} \delta P &= P^+ - P^-, \\ \delta P_{cp} &= \frac{\delta P}{2}, \\ P_{cp} &= \frac{1}{2}(P^+ + P^-), \\ P^+ &= P_{cp} + \delta P_{cp}, \\ P^- &= P_{cp} - \delta P_{cp}. \end{aligned} \quad (3.34)$$

Зазвичай поняття допуску асоціюють із полем допуску δP , яке завжди є додатним значенням. Інші характеристики допуску, такі як верхні та нижні межі,

можуть бути додатними, від’ємними або нульовими. Існують два типи задач розрахунку допусків: пряма та зворотна. У прямій задачі, задаючи допуски на параметри $P_1, \dots, P_m$, потрібно визначити відповідний допуск δB , у межах якого перебуватиме значення B . Це завдання передбачає побудову оператора перетворення Λ , який відображає допуск δP із параметричного простору $(P_1, \dots, P_m)$ у простір значень B , визначаючи допустимі межі для функції показника:

$$\delta B = \Lambda\{\delta P\}. \quad (3.35)$$

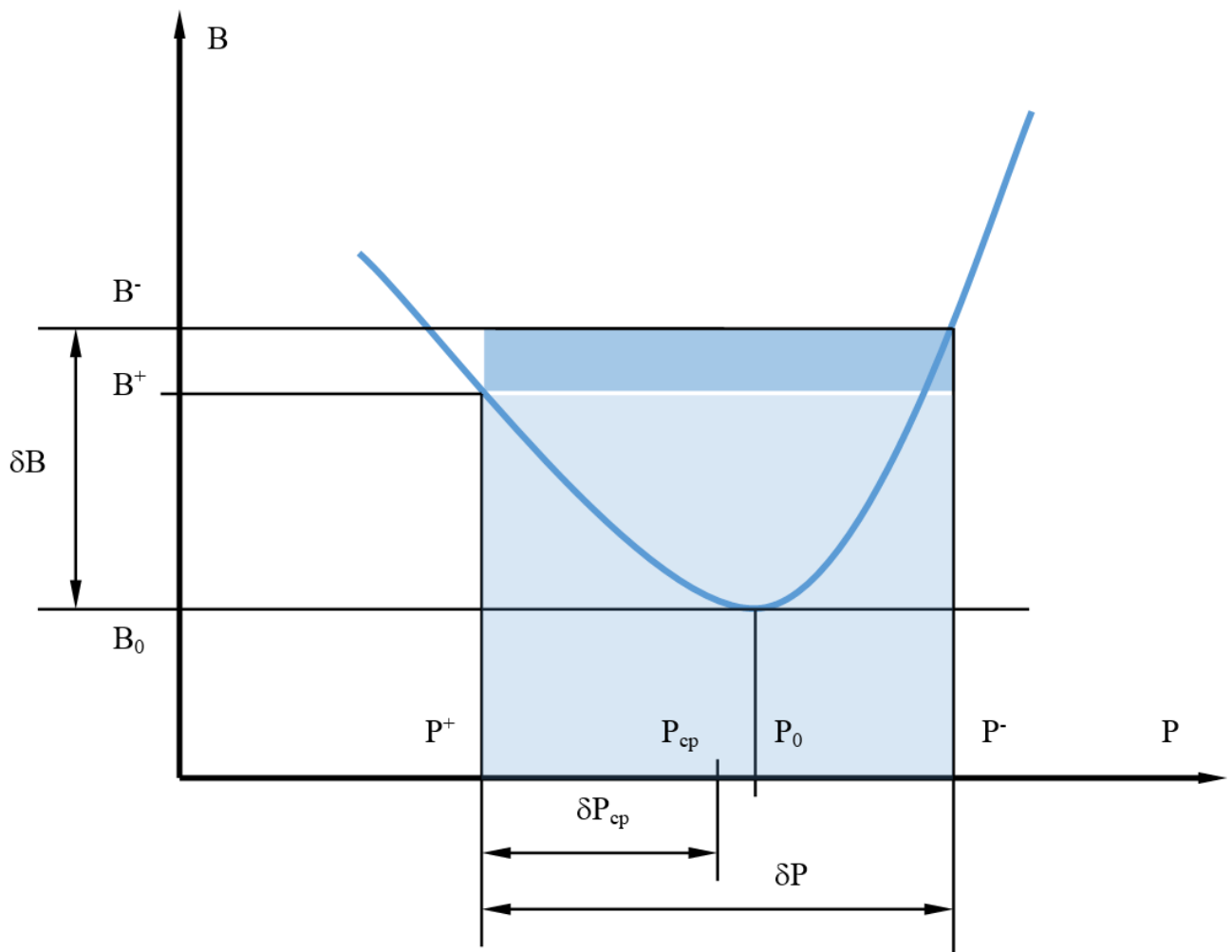


Рисунок 3.8 — Пряма задача розподілу

У зворотній задачі розподілу допусків задається допустиме значення δB для показника B , і необхідно визначити відповідні допуски δP_i для параметрів системи резервування. Це забезпечує утримання значення показника B у межах допустимого допуску δB (рис. 3.9). Математично задача полягає у знаходженні зворотного оператора перетворення Λ^{-1} , який відображає заданий допуск δB на простір параметрів, формуючи допустимі значення δP для кожного параметра резервування:

$$\delta P = \Lambda^{-1} \{ \delta B \}. \quad (3.36)$$

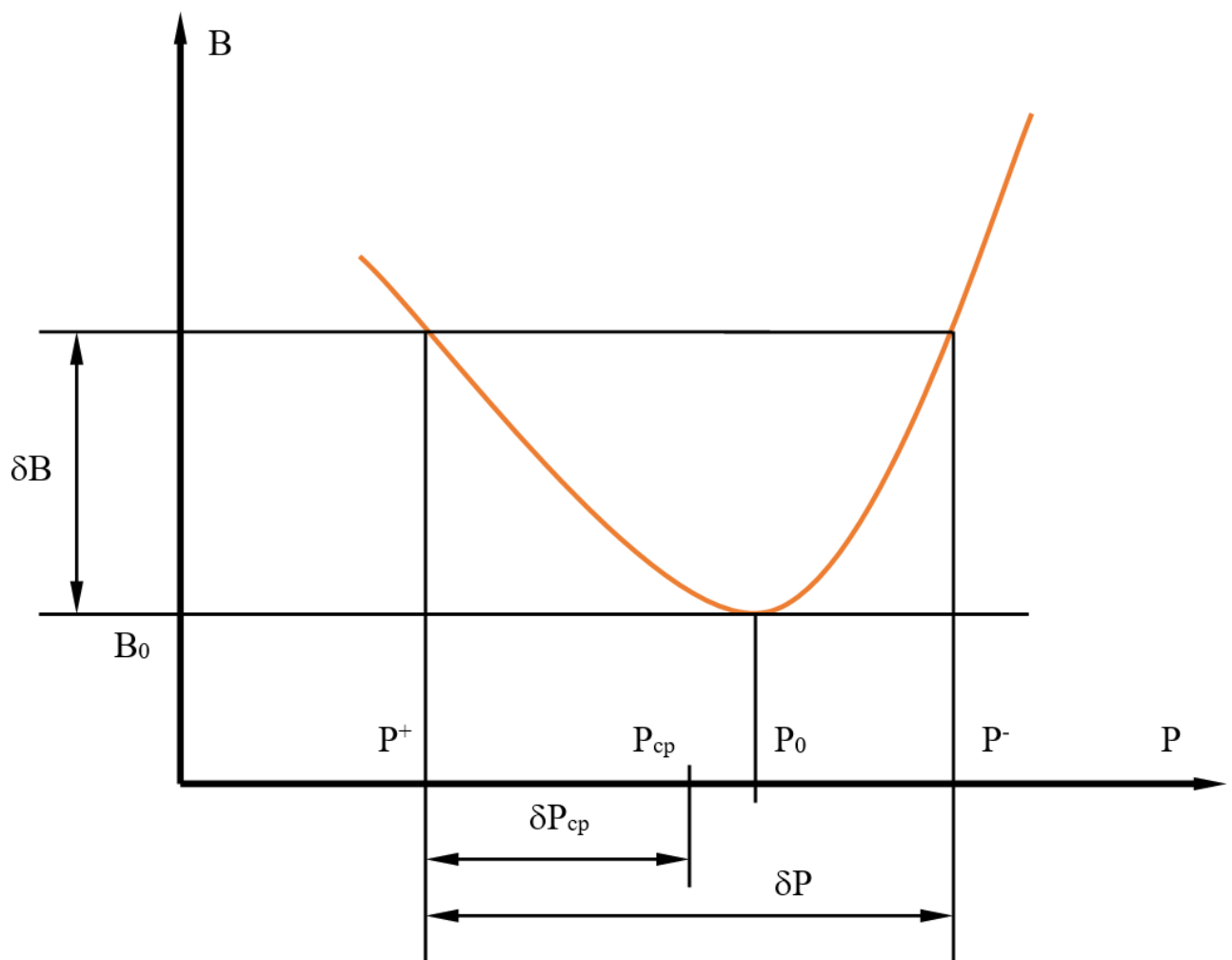


Рисунок 3.9 — Зворотня задача розподілу допусків

Пряма задача спрямована на аналіз точності функціонування системи з урахуванням можливих відхилень її параметрів. Якщо існує аналітична залежність між показником B і параметрами $P_1, \dots, P_m$, описана формулою (3.29), її розв'язання не викликає труднощів і здійснюється стандартними методами. Натомість зворотна задача розподілу допусків є значно складнішою і поки не має універсальних методів розв'язання. Деякі підходи базуються на функціях і коефіцієнтах чутливості, які є найпоширенішим інструментом для вирішення таких завдань.

3.4.2 Математичні моделі для визначення допусків

Методи теорії чутливості при розрахунку допусків припускають, що відхилення параметрів від їх номінальних значень незначні, і що зміни цих параметрів у межах допустимого поля є лінійними. В таких умовах варіацію (3.30) показника B можна виразити як функцію від цих незначних змін, що дозволяє спростити оцінку чутливості системи до відхилень її параметрів. Це дає змогу отримати наближені, але ефективні рішення для визначення допустимих меж відхилень показника в межах заданих обмежень на параметри:

$$\Delta B = \sum_{i=1}^m \beta_i \Delta P_i, \quad (3.37)$$

Де $\beta_i = \left. \frac{\partial B}{\partial P_i} \right|_{\Delta u=0}$ — коефіцієнт чутливості. У виразі (3.37) величина ΔP_i є варіацією, обумовленою як:

$$\Delta P_i = P_i - P_{io}. \quad (3.38)$$

В залежності від того, як співвідносяться величини P_i і P_{io} , варіація ΔP_i може бути як додатною, так і від'ємною. Зазначені коефіцієнти чутливості $\beta_1, \dots, \beta_m$ є відомими заздалегідь, оскільки вони залежать від конкретної моделі та обраних параметрів. Якщо орієнтуватися на найбільш небезпечне поєднання

відхилень параметрів, то для оцінки варіації показника В можна застосовувати відповідну формулу, яка враховує ці зміни та їх вплив на результат:

$$\Delta B = \sum_{i=1}^m |\beta_i| \delta P_i, \quad (3.39)$$

де $\delta P_i = \Delta P_i$ – розмір поля допуску параметра P_i .

Очевидно, що в цьому випадку за формулою (6.50) безпосередньо визначається поле допуску показника δB , тобто:

$$\delta B = \sum_{i=1}^m |\beta_i| \delta P_i.$$

Для половини поля допуску:

$$\delta B_{cp} = \sum_{i=1}^m |\beta_i| \delta P_{cp}. \quad (3.40)$$

Якщо варіації $\Delta P_1, \dots, \Delta P_m$ мають випадковий характер, для розрахунку допусків можна обмежитися використанням математичного очікування та дисперсії варіації ΔB . У цьому випадку необхідно ввести кореляційну матрицю $K_{\Delta P}$, яка відображає взаємозв'язок між різними параметрами вектора $\Delta P = (\Delta P_1, \dots, \Delta P_m)$. Кореляційна матриця дозволяє точніше оцінити вплив випадкових змін параметрів на варіацію показника В, що важливо для налаштування системи та обчислення допусків:

$$K_{\Delta P} = \begin{vmatrix} D_1 & K_{12} & \dots & K_{1m} \\ K_{21} & D_2 & \dots & K_{2m} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ K_{m1} & K_{m2} & \dots & D_m \end{vmatrix}. \quad (3.41)$$

Тоді математичне очікування $M[\Delta B]$ і дисперсія $D[\Delta F]$ варіації ΔB відповідно дорівнюють:

$$M[\Delta B] = \sum_{i=1}^m \beta_i M[\Delta P_i], \quad (3.42)$$

$$D[\Delta B] = \sum_{i=1}^m \beta_i^2 D_i + 2 \sum_{i < j} \beta_i \beta_j K_{ij}. \quad (3.43)$$

Розглянуті математичні моделі взаємозв'язують поле допуску δB та величини поля допуску параметрів δP_i в рамках як детермінованої, так і ймовірнісної постановки задачі розподілу допусків. В обох випадках головним завданням є визначення коефіцієнтів чутливості. Для вирішення цієї задачі можна використовувати різні алгоритми розподілу допусків на параметри, які обираються залежно від вибору способу резервування. Важливою умовою є мінімізація функції витрат шляхом оптимального використання потужностей, що залежать від вартості кВт·год для кожного способу.

3.4.3 Використання методу рівних впливів для визначення допусків

Враховуючи наведені вище математичні моделі, задача розподілу допусків має однозначний розв'язок лише для випадку одного параметру. Наприклад, коли:

$$\delta B = |\beta_i| \delta P_i.$$

Очевидно, що допуск δP_i потрібно вибрати так, щоб виконувалася наступна умова:

$$\delta P_{\text{дон}} \geq |\beta_i| \delta P_i,$$

де $\delta B_{\text{дон}}$ – задана допустима величина.

При цьому значення допуску δP_i при заданому значенні $\delta B_{\text{дон}}$ і відомому коефіцієнті чутливості визначається:

$$\delta P_i \leq \frac{\delta B_{\text{дон}}}{|\beta_i|}. \quad (3.44)$$

В стохастичній моделі для випадку одного параметра:

$$\mathbf{M}[\Delta B] = \beta_i \mathbf{M}[\Delta P_i], \quad D[\Delta B] = \beta_i^2 [\Delta P_i]. \quad (3.45)$$

Якщо розмір ΔP_i має симетричний розподіл, то для координати середини поля розсіювання параметра ΔP будуть:

$$\Delta P_{\text{іср}} = \mathbf{M}[\Delta P_i]. \quad (3.46)$$

Для варіації ΔB аналогічно:

$$\Delta B_{\text{ср}} = \mathbf{M}[\Delta B]. \quad (3.47)$$

В результаті маємо:

$$\Delta P_{\text{іср}} = \frac{\Delta B_{\text{ср}}}{\beta_i}. \quad (3.48)$$

Якщо розподіл B – нормальний або близький до нормального, то:

$$Pr(\Delta B - \mathbf{M}[\Delta B] < 3\sigma[\Delta B]) = 0,997,$$

тобто найбільш імовірно, що ΔB відхиляється від $M[\Delta B]$ не більш ніж на 3σ (правило трьох сигм). Тоді розмір поля допуску можна визначити:

$$\delta F = 6\sigma[\Delta B], \quad (3.49)$$

звідки на підставі розмір поля допуску параметра P_i визначається:

$$\delta u_i \leq \frac{\delta B_{don}}{|\beta_i|} = \frac{6\sigma[\Delta B]}{|\beta_i|}. \quad (3.50)$$

Коли в задачі є кілька параметрів P_i , розрахунок допусків можна здійснити методом послідовних наближень, коригуючи допуски на параметри таким чином, щоб значення ВВВ залишалося в межах заданого допуску. Проте, для великої кількості параметрів цей метод може бути обчислювально складним. Натомість принцип рівних впливів забезпечує простіший підхід: припускається, що всі складові $|\beta_i| \delta P_i$ рівні між собою, що дозволяє спростити обчислення та розподіл допусків. При цьому:

$$\delta B = m |\beta_i| \delta P_i, \quad (3.51)$$

звідки маємо:

$$\delta P_i \leq \frac{\delta B}{m |\beta_i|}. \quad (3.52)$$

Для ймовірнісної моделі (3.42)–(3.43) принцип рівних впливів у випадку нормального розподілу параметрів дозволяє одержати такий вираз для допусків:

$$\delta P_i \leq \frac{\delta B_{don}}{\sqrt{m\beta_i}}, \quad i = \overline{1, m}. \quad (3.53)$$

Розглянемо тепер проблему розподілу допусків із урахуванням економічного чинника. При виконанні розрахунків допусків логічним є прагнення забезпечити, щоб нерівності, що описують допустимі межі варіацій, відповідали реальним економічним обмеженням. Це дозволяє оптимізувати витрати і досягти балансу між технічними та економічними вимогами, мінімізуючи додаткові витрати, пов'язані з великими відхиленнями від оптимальних параметрів системи:

$$\delta B_{don} \geq \delta B = \sum_{i=1}^m |\beta_i| \delta P_i, \quad (3.54)$$

$$D_\theta[\Delta B] \leq D[\Delta B] = \sum_{i=1}^m \beta_i^2 D_i + 2 \sum_{i < j} \beta_i \beta_j K_{ij}. \quad (3.55)$$

При заданих значеннях коефіцієнтів чутливості, досягнення бажаного результату можливо лише за рахунок зменшення допусків δP_i , що, в свою чергу, вимагає підвищення точності та стабільності елементів системи. Однак це пов'язано з необхідністю збільшення вартості цих елементів, що призводить до зростання загальних витрат на систему резервування. Таким чином, виникає протиріччя між досягненням високої точності (яка залежить від співвідношень, визначених у формулах (3.54–3.55)) та економічною ефективністю. Звідси витікає, що задача розподілу допусків є оптимізаційною: необхідно знайти такі допуски для параметрів $P_1, \dots, P_m$, при яких допуск на показник B не перевищує задане значення, а загальні витрати на експлуатацію регулюючих пристроїв, враховуючи їх надійність і ресурс, є мінімальними.

При математичному формулюванні цієї задачі важливим є правильний вибір аналітичних залежностей для функцій точності та витрат. Для оцінки точності можуть бути використані вирази типу (3.39)–(3.43). Складнішою є задача вибору функції витрат, яка встановлює зв'язок між вартістю системи та

допусками на її елементи. Витрати по i -му способу резервування в залежності від допуску δP_i можна описати так:

$$B_i = B_i(\delta P_i) = B_i(\Delta P_i). \quad (3.56)$$

Тоді витрати B по забезпеченню резервування (керування резервними потужностями) в цілому можна представити у вигляді суми:

$$B = \sum_{i=1}^m B_i(\Delta P_i). \quad (3.57)$$

Основні труднощі виникають при визначенні форми функції витрат $B_i(\Delta P_i)$. Це завдання ускладнене тим, що витрати на функціонування системи автоматичного управління (САУ) можуть залежати не лише від допусків, але й від цілої низки інших факторів, таких як технічні параметри, умови експлуатації, надійність елементів і зовнішні обмеження. Оскільки ці взаємозв'язки складні та багатофакторні, розробка точної моделі витрат є непростим завданням. Для спрощення можна використовувати апроксимацію функції витрат, яка враховує основні чинники, що безпосередньо впливають на економічні витрати:

$$B_i = a_i + \frac{b_i}{\delta P_i^{\gamma_i}}. \quad (3.58)$$

Сталі a_i , b_i , γ_i у цій формулі визначаються експериментально, якщо відома вартість s_i для трьох або більше допусків.

У загальному задача оптимізації допусків зводиться до мінімізації функції $s(\delta P_1, \dots, \delta P_m)$:

$$\min \{s(\delta P_1, \dots, \delta P_m)\} \quad (3.59)$$

за умов:

$$q(\delta P_1, \dots, \delta P_m) \leq q_{\text{доп}}, \quad (3.60)$$

де $q = q(\delta P_1, \dots, \delta P_m)$ – функція точності.

У загальному випадку ця задача є завданням нелінійного програмування з сепарабельними цільовими функціями. Це означає, що кожна окрема функція витрат залежить тільки від одного параметра, а загальна цільова функція є сумою цих функцій для всіх змінних. Така структура дозволяє спростити аналіз задачі, оскільки кожна функція може бути розглянута незалежно, а її мінімізація здійснюється окремо для кожної змінної, що значно знижує складність розв'язку порівняно з більш загальними випадками нелінійних задач.

3.4.4 Розподіл допусків із використанням критеріальних моделей

Як видно, розподіл допусків у конкретних одиницях вимірювання супроводжується низкою технічних складнощів. Для того, щоб за допомогою формули (3.39) визначити варіацію критерію оптимальності, необхідно попередньо отримати значення параметрів оптимального стану системи, при якому досягаються мінімальні витрати на резервування потужності для кожного з доступних методів резервування P_{i0} . При вирішенні зворотної задачі розподілу допусків ця проблема ускладнюється ще більше. Не завжди можна використовувати метод рівних впливів, оскільки для таких складних систем, як енергетичні системи (ЕЕС), цей підхід є непридатним. Це пов'язано з тим, що ефект резервування та регулювання різних типів регулювальних пристроїв в таких системах значно відрізняється. Тому оптимізація станів цих систем вимагає врахування специфічних характеристик кожного методу. На рис. 3.10 показано критеріальні залежності сумарних витрат V_{Σ} на компенсацію нестабільності генерування ВДЕ через резервування потужності в ЕЕС, де ці залежності відображають варіативність і можливості кожного способу резервування щодо досягнення оптимального рівня витрат.

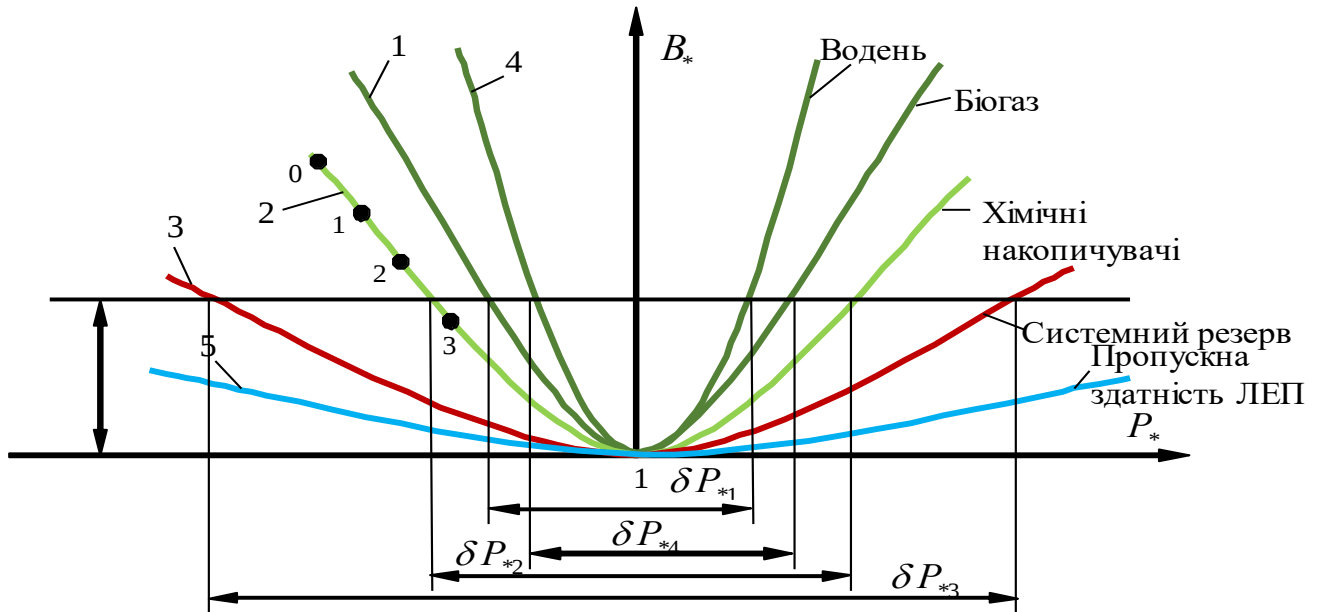


Рисунок 3.10 — Приклад критеріальних залежностей відносного значення витрат від потужності способу резервування

У відносних одиницях задача розподілу допусків може бути розв’язана в такий спосіб. Визначаються гранично допустимі значення параметрів P_{*i}^- і P_{*i}^+ :

$$P_{*}^{-} = \left(\frac{\alpha - \beta}{-\beta} \frac{a}{1 + \delta F_{*}} \right)^{-1/\alpha}, \quad P_{*}^{+} = \left(\frac{\alpha - \beta}{\beta} \frac{b}{1 + \delta F_{*}} \right)^{-1/\beta}, \quad (3.61)$$

де δF_{*} — задане допустиме відхилення критерію оптимальності від його оптимального значення у відносних одиницях; a , b , α і β — коефіцієнти функції (двочленного полинома), якою апроксимується залежність $B_{*} = f(P_{*})$:

$$B_{*} = aP_{*}^{\alpha} + bP_{*}^{\beta}. \quad (3.62)$$

Враховуючи це, обчислюються граничні значення полів допусків за наступною формулою:

$$\delta P_{*i}^{np} = P_{*i}^{+} - P_{*i}^{-}, \quad i = \overline{1, m}. \quad (3.63)$$

Для методів компенсації нестабільності генерації ВДЕ необхідно визначити вагові коефіцієнти, які відображають ступінь їх участі у процесі резервування. У системі критеріїв, де використовуються відносні одиниці, ці коефіцієнти нормуються до значення одиниці, що дозволяє забезпечити їх пропорційне відображення в загальній моделі. Для визначення вагових коефіцієнтів застосовується конкретна методика, яка дозволяє точно враховувати всі необхідні параметри, що визначають ефективність кожного способу резервування в контексті компенсації нестабільності генерації:

$$v_i = \frac{\delta P_{*i}^{np}}{\sum_{i=1}^m \delta P_{*i}^{np}}. \quad (3.64)$$

Тоді значення допуску для параметрів i -го способу на відміну від (3.52) визначиться:

$$\delta P_{*i} \leq \frac{v_i \delta B_*}{|\mu_i|}, \quad (3.65)$$

де $\mu_i = \frac{\partial B_*}{\partial P_{*i}} = \alpha_i \alpha_i P_{*i}^{\alpha_i-1} + b_i \beta_i P_{*i}^{\beta_i-1}$ — з урахуванням апроксимації функції

позиномом.

На відміну від підходу, наведеного у формулі (3.52), допуски, які визначаються за допомогою рівняння (3.65), більш точно відображають реальні можливості кожного способу резервування в рамках балансуючої групи впливати на процес оптимізації системи. За допомогою розрахунку цих допусків, зони нечутливості для різних способів резервування дозволяють ефективніше коригувати їх склад і функціонування в системі резервування. Це сприяє досягненню оптимального загальносистемного ефекту, оскільки зменшення

допусків для найбільш чутливих способів резервування (наприклад, для водню, біогазових установок і хімічних накопичувачів (рис. 3.10)) дозволяє збільшити їх участь у покритті потреб у резерві та зменшити навантаження на менш ефективні способи, як системний резерв.

Цей метод розподілу допусків не єдиний, оскільки залежно від обраної системи відносних одиниць нормування може відрізнятись. Наприклад, у диференціальній системі відносних одиниць, спеціально розробленій для аналізу критерію оптимальності в контексті оптимальних рішень, коефіцієнт нормування може бути різним, що дозволяє більш гнучко підходити до розв'язання задачі:

$$F_* = \sum_{i=1}^m \pi_i \prod_{j=1}^n P_{*j}^{\alpha_{ij}},$$

$$\text{де } \pi_i = \frac{a_i \prod_{j=1}^n P_{*j}^{\alpha_{ij}}}{B_0} \text{ — критерії подібності, а } m \text{ і } n \text{ відповідно кількість членів}$$

у цільовій функції і кількість змінних, визначаються:

$$k_j = \frac{\partial B_* / B_*}{\partial P_{*j} / P_{*j}} = \sum_{i=1}^m \alpha_{ji} \pi_i, \quad j = \overline{1, n}. \quad (3.66)$$

За своїм фізичним змістом він є нормованим коефіцієнтом чутливості. Якщо для визначення k_j вибрати точки P_{*j}^- або P_{*j}^+ , то значення допусків параметрів способів резервування визначаються:

$$\delta P_{*j} \leq \frac{\delta B_*}{k_j}. \quad (3.67)$$

У цьому випадку коефіцієнт k_j відображає вплив відносної похибки критерію B на відносну похибку параметра керування P . Він функціонує як коефіцієнт впливу, але виражений у відносних одиницях. Якщо допустима похибка задана з інженерних міркувань, виникає нова задача. Необхідно врахувати похибку в математичній моделі під час оцінки чутливості оптимальних рішень. Оскільки використовується критеріальна модель, похибка буде впливати на значення критеріїв подібності.

Відповідно до (3.66) критерії подібності в цьому випадку визначаються із системи рівнянь:

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^m \alpha_{ji} \pi_i = k_j, & i = \overline{1, n}; \\ \sum_{i=1}^{m_1} \pi_i = 1. \end{cases} \quad (3.68)$$

Розподіл допусків за допомогою диференціальної системи відносних одиниць корисно використовувати, коли модель потрібно досліджувати в точках, координати яких відрізняються від стаціонарної точки на певну величину. Однак, коли дослідження ведеться в області екстремуму, доцільно застосувати модифікацію цієї системи, де коефіцієнти k_j приймають значення нуль. У цьому випадку система лінійних рівнянь (3.68) перетворюється в ортонормовану систему, що відповідає критеріальним одиницям.

Згідно зі співвідношенням:

$$F_* = \sum_{i=1}^{m_1} \pi_i \prod_{j=1}^m P_{j*}^{\alpha_{ji}}. \quad (3.69)$$

може бути розв'язана пряма і зворотна задачі чутливості. За умови апроксимації цільової функції двочленним полиномом виду:

$$B_{*i} = \pi_{1i} P_{*i}^{\alpha_i} + \pi_{2i} P_{*i}^{\beta_i}, \quad (3.70)$$

розв'язок зворотної задачі чутливості може бути отриманий в аналітичній формі. В (3.70) π_{1j} , π_{2j} – критерії подібності, а α_i , β_i – постійні коефіцієнти, які відображають характер залежності і міру впливу P_{*i} на значення B_* .

Згідно із запропонованою методикою, вирази для обчислення граничних значень області оптимальності параметрів мають вигляд:

$$P_{i*}^- = \left(\frac{\alpha - \beta}{-\beta} \frac{\pi_{1i}}{1 + \delta B_*} \right)^{-1/\alpha}, \quad P_{i*}^+ = \left(\frac{\alpha - \beta}{\alpha} \frac{\pi_{2i}}{1 + \delta B_*} \right)^{-1/\beta}. \quad (3.71)$$

Отримані результати стосуються випадку, коли критерії подібності π_i можна вважати сталими коефіцієнтами. Проте в реальних системах це трапляється досить рідко. Зазвичай числові значення критеріїв подібності визначаються через відношення параметрів досліджуваної системи, які мають певну похибку або неточність у вимірюваннях, що може впливати на точність оцінок. В цьому випадку критерії подібності визначаються, як:

$$\pi_{ji} = \pi_{ji} + \delta\pi_{ji}, \quad j = \overline{1, 2}, \quad (3.72)$$

де $\delta\pi_{ji} = \frac{\delta b_{ji} P_{i0}^2}{F_{\min}}$ — відхилення чисельного значення критерію подібності при

зміні параметрів математичної моделі на певну величину Δ ;

δb_{ji} – коефіцієнт чутливості першого порядку параметрів математичної моделі.

З врахуванням останнього виразу межі області оптимальності на відміну від (3.71) визначаються за формулами:

$$P_{i*}^- = \left(\frac{\alpha - \beta}{-\beta} \frac{\pi_{1i} + \delta\pi_{1i}}{1 + \delta B_*} \right)^{-1/\alpha}, \quad P_{i*}^+ = \left(\frac{\alpha - \beta}{\alpha} \frac{\pi_{2i} + \delta\pi_{2i}}{1 + \delta B_*} \right)^{-1/\beta} \quad (3.73)$$

Отже, для однопараметричної задачі використання критеріального методу дозволяє розв'язати зворотну задачу чутливості аналітично, що завершить процес розв'язання цієї задачі. Для багатопараметричних задач оптимальні області окремих параметрів визначаються через розподіл допусків на регульовальні параметри u , при заданому δF . Далі розглянемо, як можна вирішити цю задачу в іменованих і відносних одиницях, що дозволяє більш детально аналізувати залежність від параметрів.

В реальній системі з різних причин значення параметрів відрізняються від оптимальних на величини $\Delta P_1, \dots, \Delta P_m$. При цьому критерій оптимальності отримує приріст:

$$\Delta B = B(P_{10} + \Delta P_1, \dots, P_{m0} + \Delta P_m) - B_0.$$

Система є працездатною, якщо

$$\Delta B(\Delta P_1, \dots, \Delta P_m) \in \Delta M_B, \quad (3.74)$$

де ΔM_B - допустима множина (область) значень варіацій критерію оптимальності ΔB , яка характеризує допуски;

При використанні методів теорії чутливості для розрахунку допусків вважається, що відхилення параметрів від оптимальних значень незначні, а зміни в межах поля допуску є лінійними. У такому разі варіація (3.74) критерію оптимальності B визначається через задану формулу, що пов'язує зміни параметрів із впливом на кінцевий показник:

$$\Delta B = \sum_{i=1}^m \mu_i \Delta P_i, \quad (3.75)$$

де $\mu_i = \left. \frac{\partial B}{\partial P_i} \right|_{\Delta P=0}$ — коефіцієнт чутливості. В останньому виразі величина ΔP_i є

варіацією, яка визначається як $\Delta P_i = P_i - P_{i0}$.

Якщо розраховувати на найгірше поєднання відхилень параметрів, то для оцінки допусків користуються формулою:

$$\Delta B = \sum_{i=1}^m |\mu_i| \delta P_i^h, \quad (3.76)$$

де $\delta P_i^h = \Delta P_i$ - половина поля допуску параметра P_i .

Згідно з формулою (3.76), поле допуску критерію оптимальності dBdBdB визначається безпосередньо. Коли йдеться про кілька параметрів, розрахунок допусків може бути здійснений методом послідовних наближень, коригуючи допуски для параметрів таким чином, щоб значення критерію ВВВ залишалося в межах заданого допуску. Однак цей підхід є обчислювально складним при великій кількості параметрів. Простішим є алгоритм, який базується на принципі рівних впливів, згідно з яким усі складові $(|\mu_i| \delta P_i)$ у формулі (3.76) мають рівні значення. При цьому:

$$\delta B = m |\mu_i| \delta P_i^h,$$

звідки:

$$\delta P_i^h \leq \frac{\delta B}{m |\mu_i|}. \quad (3.77)$$

Розподіл допусків в іменованих одиницях, як видно, супроводжується низкою складнощів. Щоб визначити варіації критерію оптимальності згідно з (3.75), спершу необхідно знайти значення параметрів P_{i0} . При розв'язанні зворотної задачі допусків проблема ускладнюється ще більше. Принцип рівних впливів є непридатним для таких систем, як ЕЕС, оскільки реальні ефекти змін

параметрів у них істотно відрізняються. Як показано на рис. 3.10, критеріальні залежності $B_*=f(P_*)$ відображають різний вплив параметрів на оптимізацію режимів системи. У відносних одиницях задачу розподілу допусків можна вирішити, використовуючи формули (3.71) або (3.73) для визначення граничних значень параметрів. Використовуючи ці дані, обчислюються:

$$\delta P_{*i} = P_{*i}^+ - P_{*i}^-. \quad (3.78)$$

Для параметрів визначаються їх вагові коефіцієнти. Вони можуть бути визначені в результаті нормування δP_{*i} наступним чином:

$$v_i = \frac{\delta P_{*i}}{\sum_{i=1}^m \delta P_{*i}}. \quad (3.79)$$

Значення допуску δP_{*i}^h при заданому значенні δB_* визначається:

$$\delta P_{*i}^h \leq \frac{v_i \delta B_*}{|\mu_i|}, \quad (3.80)$$

$$\text{де } \mu_i = \frac{\partial B_*}{\partial P_{*i}} = \pi_{i1} \alpha_i P_{*i}^{\alpha_i-1} + \pi_{i2} \beta_i P_{*i}^{\beta_i-1}.$$

На відміну від (3.65), допуски, визначені за формулою (3.80), точніше відображають реальні можливості кожного методу резервування впливати на оптимізацію витрат. Такий підхід дозволяє досягти більш обґрунтованого та технічно ефективного загальносистемного ефекту. Важливо зазначити, що методи розподілу допусків у відносних одиницях мають варіативність, оскільки нормування може бути виконано не лише до одиниці, а й за іншими системами одиниць залежно від конкретних вимог задачі. У диференціальній системі

відносних одиниць, розроблених для аналізу критерію оптимальності в області оптимальних рішень, коефіцієнти нормування визначаються:

$$k_j = \frac{\partial B / B}{\partial P / P} = \sum_{i=1}^m \alpha_{ji} \pi_i, \quad i = \overline{1, n}.$$

Якщо для визначення k_j вибрати точку P_{*j}^- або P_{*j}^+ , то значення половини поля допуску визначається:

$$\delta P_{*j}^h \leq \frac{\delta P_*}{k_j}.$$

У цьому випадку коефіцієнт k вказує на вплив відносної похибки критерію B на відносну похибку параметра P , тобто він функціонує як коефіцієнт впливу. Завдяки цьому підходу можна враховувати похибки при визначенні області оптимальності та зон нечутливості критеріїв подібності. Запропонований алгоритм для оцінки чутливості та розподілу допусків на параметри може бути реалізований у програмному забезпеченні. Тому при аналізі чутливості оптимальних рішень ефективно застосовувати методи теорії подібності та моделювання, дозволяючи досліджувати чутливість без необхідності визначати функції чутливості та оптимальні параметри.

3.5 Висновки

Особливістю роботи ВДЕ в енергосистемах є їх вплив на режимну та балансову надійність. Оскільки вітрові та сонячні електростанції мають нерівномірні графіки генерування, резервування є необхідним для забезпечення надійності. Це може включати резерви з теплових електростанцій, а також різні технології накопичення енергії, такі як гідроакumuлюючі станції, водневі та біогазові технології. Крім того, важливу роль відіграють технічні та

організаційні заходи для оптимізації графіків генерування і споживання електроенергії.

Для мінімізації витрат на резервування використовується критеріальний метод, який дозволяє ефективно оцінити різні способи резервування на основі обмеженої інформації, зокрема через критерії подібності. Це дозволяє не лише оцінити витрати, але й визначити, які способи резервування є найбільш ефективними в конкретних умовах.

Особливу увагу слід приділяти аналізу чутливості витрат на компенсацію нерівномірності генерування, оскільки зміни в оптимальних параметрах можуть істотно вплинути на загальні витрати. Аналіз чутливості дозволяє не лише оцінити витрати на резервування, а й оптимізувати використання різних технологій в залежності від змінних умов.

У рамках багатопараметричних задач чутливості розроблено алгоритм для розподілу допусків на параметри, що дозволяє здійснити точніші оцінки та досягти оптимальних результатів за допомогою методу послідовних наближень або принципу рівних впливів.

Крім того, за допомогою критеріального моделювання досягається більш обґрунтоване розподілення потужностей у системі резервування, що сприяє досягненню загальносистемного ефекту. Для забезпечення балансу потужностей у енергосистемі важливо використовувати різноманітні маневрені потужності, зокрема теплові, атомні та гідроелектростанції, а також новітні технології накопичення енергії.

4 ЗАХОДИ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ НАДІЙНОЇ ТА БЕЗПЕЧНОЇ ЕКСПЛУАТАЦІЇ ЕЛЕКТРОУСТАНОВОК

Безпека обслуговуючого персоналу залежить від умов праці, стану електрообладнання та інших факторів, які впливають на роботу персоналу. Основне завдання - визначення небезпечних факторів та умов праці. Багато факторів на сонячних електростанціях можуть негативно впливати на здоров'я людини.

Закон України "Про охорону праці" вимагає, щоб роботодавець забезпечував права працівників на охорону їх життя та здоров'я. Без дотримання цих правил, неможливо експлуатувати будь-який об'єкт, включаючи сонячні електростанції.

4.1 Завдання розділу

Небезпека протікання струму, недостатній переріз проводу та ненадійні металеві контакти призводять до підвищеного ризику травматизму та можуть спричинити пожежу на електростанції.

Це підкреслює важливість дотримання правил безпеки та розвитку технологій, що мінімізують ризики травматизму під час монтажу сонячних електростанцій.

Встановлення, експлуатація та безпека фотоелектричних систем в Україні відбуваються згідно з вимогами таких документів: ДСТУ 7503:2014 "Геліоенергетика. Станції фотоелектричні. Терміни та визначення понять" і ДСТУ 8328:2015 "Геліоенергетика. Модулі фотоелектричні. Загальні технічні вимоги".

Враховуючи все вище згадане, можемо сформулювати ряд ключових завдань, які необхідно висвітлити в даному розділі:

1. Провести аналіз умов праці при виконанні робіт пов'язаних з монтажем сонячних електростанцій, які працюють в ОЕС України за міждержавним ДСТУ 12.0.003-74.

2. Розробити організаційно-технічні рішення з охорони праці при електричному монтажі сонячних панелей. Розрахувати параметри заземлюючого пристрою.

3. Описати основні заходи протипожежного захисту на сонячних станціях.

4.2 Умови праці, під час виконання монтажних робіт вітрогенераторів

Згідно міжнародного регулюючого документу з охорони праці ДСТУ 12.0.003-74, персонал, який відповідає за електротехнічне обслуговування, та персонал, завданням якого є ремонт обладнання на сонячних електростанціях, піддані впливу небезпечних факторів, таких як:

- підвищений рівень запиленості та загазованості робочої зони;
- підвищена чи понижена температура поверхонь обладнання (в залежності від пори року);
- підвищена чи понижена температура повітря робочої зони (в залежності від пори року);
- підвищена та понижена вологість повітря робочої зони;
- підвищений рівень напруги електричного кола, замикання якого може відбуватись через тіло людини;
- підвищена чи понижена рухливість повітря;
- підвищена вологість повітря;
- недостатня освітленість робочої зони;
- відсутність або недовідність природного світла
- підвищена яскравість повітря;
- підвищений рівень шуму;
- підвищений рівень вібрації
- розташування робочого місця в небезпечній висоті щодо поверхні землі (підлоги);

Психофізіологічні небезпечні й шкідливі фактори:

- фізичні перевантаження;

– нервово-психічні перевантаження (монотонність праці перенапруга аналізаторів, необережні дії, недбале виконання робіт).

Джерелами небезпеки є:

- електрообладнання;
- природне середовище;
- людина.

4.3 Розробка організаційно-технічних рішень з охорони праці при електричному монтажі вітрогенераторів

Для розробки рішень з охорони праці при електричному монтажі вітряка заданих технологічних параметрів за темою диплому були проаналізовані Державні стандарти релейного захисту та автоматики України табл. 4.1. та Галузеві керівні документи:

Аналіз нормативно-технічної літератури дозволив виділити ряд од-нотипних операцій при експлуатації РЗА.

Таблиця 4.1 – Державні стандарти України з релейного захисту та автоматики

1	ДСТУ Б Д.1.1-1:2013	Реконструкція пристроїв релейного захисту та автоматики блоку генератор-трансформатор.	чинний
2	ДСТУ ІЕС 60044-1:2008	Трансформатори вимірювальні (ІЕС 60044-1:2003, IDT)	чинний
3	ДСТУ 2936-94	Реле електричні. Терміни та визначення	чинний
4	ДСТУ ІЕС 60050-604:2004	Словник електротехнічних термінів	чинний

Кліматичні умови визначаються шляхом вимірювання температури, відносної вологості та швидкості руху повітря. Відповідно, ці показники не повинні виходити за межі установлених допустимих значень:

- температура повітря в теплу пору року не більше плюс 28 °С;

- швидкість вітру 0,2- 0,6 м/с;
- відносна вологість не більше 75 %.

Монтаж пристроїв РЗА виконується в світлу пору доби з освітленістю не менше 200 лк на робочому місці монтажника. Підготовка робочої площадки включає розчищення місця, розкладання приладдя та інструменту на брезенті, перевірку цілісності та якості випробування ізолюючих засобів, а також одягання захисного одягу, касок і запобіжних поясів. Керівник робіт забезпечує безпеку всіх технологічних операцій і наглядає за всією бригадою, не беручи безпосередньо участі у роботі.

В процесі установки вітряка для мінімізації ризику травматизму необхідно дотримуватися наступних організаційно-технічних вимог техніки безпеки та виробничої санітарії:

- виконання електромонтажних робіт доручається особам, що пройшли медичний огляд і спеціальне навчання для роботи на електроустановках;
- монтаж вітряка краще проводити в безвітряний день;
- основні операції установа генератора повинні проводитися на рівні землі;
- при проведенні робіт на висоті повинні встановлюватися обгороджування і позначатися в установленому порядку межі небезпечних зон;
- при неможливості облаштування обгороджувань монтажні роботи повинні виконуватися із застосуванням запобіжного пояса і страхувального каната;
- електричні з'єднання повинні проводитися за розробленою монтажною схемою системи.
- в ланцюгах, що підключаються до акумулятора, необхідно встановити плавкі запобіжники або автоматичні вимикачі відповідного номіналу;
- протягом встановлення вітряка акумуляторні батареї повинні бути від'єднані;
- до підключення дротів акумулятора вихідні дроти вітротурбіни повинні бути з'єднані між собою;

- забороняється наближатися до турбіни на небезпечну відстань, коли вона працює;
- не слід поєднувати при контактних електричних з'єднаннях разом різні метали (наприклад, мідь і алюміній);
- всі електричні кабелі електроживлення повинні мати надійну ізоляцію та відповідати технологічним вимогам;
- для захисту людей від ураження електричним струмом повинно бути виконано заземлення.

4.3 Розрахунок параметрів заземлюючого пристрою ВЕС

Відповідно до ПУЕ:2014, заземлюючий пристрій електростанції повинен мати опір не більше 4 Ом. Для забезпечення захисту від непрямого дотику, всі металеві корпуси електротехнічного обладнання та екрани кабельних ліній повинні бути підключені до заземлюючого пристрою. Прокладають сталевий круг по периметру РП-10 кВ, який приєднується до загального заземлюючого пристрою в двох точках. Опір заземлювачів значно впливає верхній шар ґрунту на глибині до 20-25 м, а питомий опір ґрунтів залежить від їх складу, розмірів, щільності, вологості, температури та наявності хімічних речовин.

Найбільш важливими факторами, що впливають на величину питомого опору ґрунту, є вологість і температура. Протягом року в зв'язку зі зміною атмосферних і кліматичних умов утримання вологи в ґрунті: і його температура змінюються, а отже, змінюється і питомий опір. Найбільш різкі коливання питомої опору спостерігаються у верхніх шарах землі, які взимку промерзають, а влітку висихають. З даних вимірювань випливає, що при зниженні температури повітря від 0 до -10°C питомий опір ґрунту на глибині 0,3 м збільшується в 10 разів, а на глибині 0,5 м - в 3 рази.

Розрахунок контуру заземлювачів зводиться до визначення такого числа розміщення штучних заземлювачів, при якому опір розтікання струму не перевищує нормоване значення.

Для обґрунтування параметрів заземлюючого пристрою, який використовується в схемі заземлення проведемо розрахунок за загальноприйнятою методикою.

При розрахунку будемо використовувати програмне забезпечення Mathcad.

Тип заземлювального пристрою – вертикальні сталеві труби з розмірами:

$l_B = 3$ м; $d_B = 0,05$ м; товщина стінки $\delta = 4$ мм; відстань між вертикальними заземлювачами $a = 6$ м., тобто $a/l_B = 2$. Глибина закладання заземлювачів $H_0 = 0,8$ м., $B_c = 30$ мм.

Ґрунт – глина; склад – однорідний; вологість – нормальна. Кліматична зона – III.

Визначаємо розрахунковий питомий опір чорнозему

$$\rho_{\text{розр.}} = \rho_{\text{табл.}} \cdot K_c, \quad (4.1)$$

де $\rho_{\text{табл.}} = 40$ Ом – приблизні значення питомих електричних опорів різних ґрунтів та води, Ом·м

$K_c = 1,3$ – коефіцієнт сезонності $K_{c.v.}$ для однорідної землі при вимірюванні її опору:

$$\rho_{\text{розр.}} = 40 \cdot 1,3 = 52 \text{ (Ом} \cdot \text{м)}$$

Визначаємо відстань від поверхні землі до середини вертикального заземлювача (рис. 4.2):

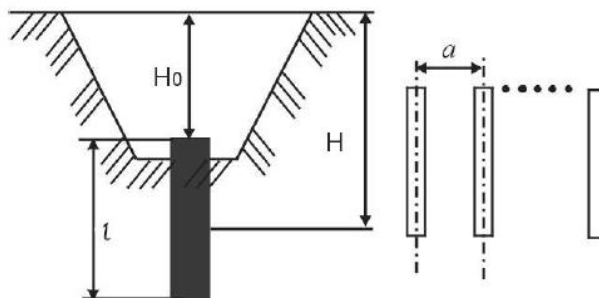


Рисунок 4.2 – Схема розміщення заземлювача в ґрунті

$$H = H_0 + \frac{l_B}{2} \quad (4.2)$$

$$H = 0,8 + \frac{3}{2} = 2,3 \text{ (м)}$$

Визначаємо опір розтікання струму в одному вертикальному заземлювачі:

$$R_B = 0,366 \frac{\rho_{\text{розр.}}}{l_B} \left(\lg \frac{2l_B}{d} + \frac{1}{2} \lg \frac{4H + l_B}{4H - l_B} \right); \quad (4.3)$$

$$R_B = 0,366 \frac{52}{3} \left(\lg \frac{2 \cdot 3}{0,05} + \frac{1}{2} \lg \frac{4 \cdot 2,3 + 3}{4 \cdot 2,3 - 3} \right) = 14,123 \text{ (Ом)}.$$

Визначаємо орієнтовну кількість вертикальних заземлювачів при $\eta_B = 1$

де η_B – коефіцієнт використання вертикальних заземлювачів

$$n_{\text{OP}} = \frac{R_B}{R_d \cdot \eta_B} \quad (4.4)$$

$$n_{\text{OP}} = \frac{15,578}{4 \cdot 1} = 3,531; \text{ приймаємо } n_{\text{OP}} = 4 \text{ шт.}$$

Визначаємо коефіцієнт використання вертикальних заземлювачів η_B , заземлювачі розташовані в ряд, а / $l_B = 2, n = 4$. Приймаємо $\eta_B = 0,89$.

Визначаємо необхідну кількість вертикальних заземлювачів з врахуванням коефіцієнта використання:

$$n_B = n_{\text{OP}} / \eta_B; \quad (4.5)$$

$$n_B = 4 / 0,89 = 3,56.$$

Приймаємо $n_B = 4$ шт.

Визначаємо розрахунковий опір розтікання струму у вертикальних заземлювачах при $n_B = 4$ шт без врахування з'єднувальної стрічки:

$$R_{\text{розр.в.}} = \frac{R_B}{n_B \cdot \eta_B}; \quad (4.6)$$

$$R_{\text{розр.в.}} = \frac{14,123}{4 \cdot 0,89} = 3,967 \text{ (Ом)}.$$

Визначаємо довжину з'єднувальної стрічки:

$$L_c = 1,05 \cdot a(n-1); \quad (4.7)$$

$$L_c = 1,05 \cdot 6(4-1) = 18,9 (\text{м}).$$

За формулою (4.8) для горизонтальних електродів, розташованих в ґрунті, визначаємо опір розтікання струму:

$$R_\Gamma = 0,366 \frac{\rho_{\text{розр.}}}{L_c} \lg \frac{2 \cdot (L_c)^2}{H_o \cdot B_c}; \quad (4.8)$$

$$R_\Gamma = 0,366 \frac{52}{18,9} \lg \frac{2 \cdot (18,9)^2}{2,3 \cdot 0,05} = 3,82.$$

Визначаємо коефіцієнт використання горизонтального заземлювача. при $a/l=2$, $n=4$. Приймаємо $\eta_\Gamma = 0,55$.

Визначаємо розрахунковий опір розтікання струму в горизонтальному заземлювачі з врахуванням η_Γ :

$$R_{\text{розр.}\Gamma} = \frac{R_\Gamma}{\eta_\Gamma}; \quad (4.9)$$

$$R_{\text{розр.}\Gamma} = \frac{3,82}{0,55} = 6,945 (\text{Ом}).$$

Визначаємо розрахунковий опір розтікання струму заземлювального пристрою:

$$R_{\text{розр.}} = \frac{R_{\text{розр.В}} \cdot R_{\text{розр.}\Gamma}}{R_{\text{розр.В}} + R_{\text{розр.}\Gamma}}; \quad (4.10)$$

$$R_{\text{розр.}} = \frac{3,967 \cdot 6,945}{3,967 + 6,945} = 2,525 (\text{Ом});$$

Отриманий розрахунковий опір розтікання струму відповідає вимогам ПУЕ пункту 1.7.92, що опір заземлювального пристрою не повинен перевищувати значення 4 Ом при рівні напруги 380 В.

У випадках коли кабель перетинається з комунікаціями, його прокладають в спеціальних трубах. Трансформаторна підстанція (ТП) розміщена у приміщенні виробничого корпусу, від технологічного обладнання її повинні огорджувати спеціального огорожею. Двері в ТП зачиняються на замок, на цих

дверях повинен бути нанесено попереджувальний знак «Обережно! Електрична напруга».

4.4 Протипожежний захист приміщення релейного захисту та автоматики

НАПБ 05.032-2002 державний стандарт протипожежного захисту розподільних пристроїв, підстанцій та трансформаторів.

Загальними вимогами при плануванні і монтажі підстанції є

- на відкритих і закритих розподільних пристроях і підстанціях напругою 35 кВ та вище повинні передбачатися протипожежні заходи залежно від зарахування підстанцій до певної групи;
- на підстанціях III групи в одноповерхових будівлях і спорудах допускається застосовувати незахищені металеві конструкції типу "сендвіч" і "монопанель" з важко-горючим або негорючим утеплювачем;
- до синхронних компенсаторів із водневим охолодженням необхідно передбачати централізовану подачу водню та вуглекислоти або азоту (для витіснення водню). Ручне керування подачею водню і вуглекислоти або азоту слід розміщувати в безпечному під час пожежі місці;
- місця з'єднання жил проводів і кабелів повинні мати мінімальний перехідний опір, щоб уникнути їх перегрівання і пошкодження ізоляції стиків. Струм втрат ізоляції стиків повинен не перебільшувати струму втрат ізоляції цілих жил проводів і кабелів;
- усе електрообладнання (корпуси електричних машин, трансформаторів, апаратів, світильників, розподільних щитів, щитів керування) підлягає зануленню або заземленню відповідно до вимог ПУЕ.
- для трансформаторів (реакторів) потужністю до 10 МВ·А допускається виконання маслоприймачів без відведення масла. При цьому маслоприймачі слід виконувати заглибленими, розрахованими на повний об'єм масла, що вміщується над ним в обладнанні, та закриватися металевими ґратами, зверху на які повинен бути насипаний завтовшки 0,25 м шар чистого гравію, або

шар промитого гравійного щебню, або шар непористого щебню іншої породи з частинками завбільшки від 30 до 70 мм;

- масловідводи повинні забезпечувати відведення з маслоприймача масла і води, яка застосовується для гасіння пожежі автоматичними стаціонарними установками, на безпечну в пожежному відношенні відстань від обладнання і споруд; 50% масла та вся кількість води повинні видалятися не довше ніж за 0,25 год. Масловідводи можуть виконуватись у вигляді підземних трубопроводів;

- фундаменти під маслонаповнені трансформатори або апарати слід виконувати з негорючих матеріалів;

- трансформатори слід установлювати так, щоб отвір вихлопної труби не був направлений на близько встановлене обладнання. Для виконання цієї вимоги допускається встановлення загороджувального щита навпроти отвору труби;

- пуск автоматичних установок пожежогасіння здійснюється за допомогою диференціального та газового захисту трансформаторів, автотрансформаторів і шунтувальних реакторів;

- автоматичний пуск установки повинен дублюватися дистанційним пуском із щита керування або ручним пуском;

- будівлі й приміщення закритих розподільних пристроїв та камери трансформаторів повинні бути I або II ступеня вогнестійкості.

- у приміщеннях для ЗРП напругою 110 і 220 кВ у верхній частині стін належить передбачати віконні прорізи із заскленням площею, яка дорівнює 30% площі однієї найбільшої зовнішньої стіни;

- масляні трансформатори, розміщені всередині приміщень, належить встановлювати кожний в окремій камері, розташованій у першому поверсі та ізольованій від інших приміщень будівлі;

- у закритих окремо розташованих, прибудованих і вбудованих у виробничі приміщення підстанціях, у камерах трансформаторів, масляних

вимикачів та інших масло-наповнених апаратів із масою масла в одиниці обладнання більше 600 кг повинен бути влаштований пандус або поріг із негорючого матеріалу в дверному прорізі камер чи в прорізі вентиляційного каналу, розрахований на утримання 20% масла трансформатора або апарата. Повинні бути також передбачені заходи проти розтікання масла через кабельні споруди;

– двері (ворота) камер, що містять маслонаповнене електрообладнання, повинні бути протипожежними з межею вогнестійкості не менше 0,75 год, коли вони виходять у приміщення, котре не відноситься до цієї підстанції, у прорізи у міжповерхових перекриттях, стінах, перегородках і т.ін. повинні бути закриті негорючим матеріалом, який забезпечує межу вогнестійкості не менше 0,75 год. Отвори в місцях проходу кабелів повинні мати ущільнення з межею вогнестійкості 0,75 год;

– перекриття кабельних каналів і подвійної підлоги повинні бути виконані знімними плитами з негорючих матеріалів на одному рівні з чистою підлогою приміщення. Маса окремої плити перекриття повинна бути не більше 50 кг;

4.5 Висновки

1. Проведений аналіз літератури та нормативної документації з охорони праці та виконані розрахунки дозволили: провести аналіз умов праці при виконанні робіт пов'язаних з монтажем релейного захисту та автоматики, які працюють в складі електроенергетичної системи України; розробити організаційно-технічні рішення з охорони праці при електричному монтажі релейного захисту; запропонувати параметри блискавкозахисту для конкретних умов експлуатації будівлі релейного захисту та автоматики, що в свою чергу підвищує рівень безпеки на спеціальному об'єкті; запропонувати описати основні заходи протипожежного захисту для будівлі релейного захисту та автоматики.

2. Урахування та виконання запропонованих заходів з охорони праці

дозволяє мінімізувати ризик травматизму та професійного захворювання при виконанні робіт при експлуатації та електричному монтажі релейного захисту та автоматики.

ВИСНОВОК

У дипломній роботі всебічно розглянуто проблему компенсації нестабільності генерації відновлювальних джерел енергії (ВДЕ) через використання різноманітних технічних і методологічних підходів. Основну увагу приділено розумінню потреби компенсації нестабільності таких джерел, як сонячні, вітрові, гідроенергетичні, геотермальні та біоенергетичні системи.

Перший розділ роботи детально аналізує проблему використання негарантованих джерел електроенергії, таких як сонячна та вітрова енергетика. Показано, що нестабільність їхньої генерації є однією з основних проблем, пов'язаних із інтеграцією ВДЕ в енергетичні системи. Використання накопичувачів енергії як засіб підвищення стабільності генерування та інтеграція цих джерел в комбіновані системи енергопостачання розглянуті як ефективні методи компенсації коливань генерації.

Другий розділ зосереджується на перевагах і практичному застосуванні методу критеріального програмування в енергетичних задачах. Поглиблено аналізуються екологічні, економічні та технічні критерії, що використовуються при проєктуванні та оптимізації енергетичних систем з ВДЕ. Також розглянуто формалізацію задач і застосування алгоритмів для вирішення проблем стабільності генерації, зокрема через оптимізацію енергетичних витрат на резервування.

У третьому розділі детально розглянуто критеріальний метод у забезпеченні балансу енергії в системах з ВДЕ. Аналізуються різні моделі, які дозволяють оптимізувати використання хімічних накопичувачів енергії та біогазових установок для компенсації коливань генерації ВДЕ. Зокрема, було досліджено, як за допомогою цих моделей можна знизити витрати на резервування та підвищити стабільність енергетичних постачань.

Четвертий розділ присвячений питанням безпеки та надійності експлуатації електроустановок, зокрема вітрогенераторів. Розглянуті умови праці під час монтажу вітрогенераторів, організаційно-технічні рішення з

охорони праці та протипожежний захист. Важливими аспектами є також розрахунки параметрів заземлення і забезпечення безпеки приміщень релейного захисту та автоматики.

Загалом, робота продемонструвала важливість інтеграції різноманітних методів компенсації нестабільності генерації ВДЕ для забезпечення сталого енергетичного розвитку. Окрім цього, застосування методу критеріального програмування та інших оптимізаційних підходів дозволяє ефективно вирішувати завдання управління енергетичними системами з ВДЕ, що сприяє зниженню витрат на резервування та підвищенню їхньої надійності. Розглянуті технологічні рішення та методи є важливим кроком до забезпечення енергетичної незалежності та розвитку чистої енергетики в Україні.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Cesifo Group Munich. CESifo Working Paper No. 7442. URL: https://www.cesifo.org/DocDL/cesifo1_wp7442.pdf.
2. Solar Power Europe. *Global Market Outlook for Solar Power 2024–2028*. URL: <https://www.solarpowereurope.org/insights/outlooks/global-market-outlook-for-solar-power-2024-2028/detail>.
3. Норми технологічного проєктування енергосистем та електричних мереж 35 кВ та вище: СОУ-Н ЕЕ 40.1-00100227-101:2014.
4. Національна комісія, що здійснює державне регулювання у сферах енергетики та комунальних послуг. *Звіт про результати діяльності НКРЕКП у 2018 році*. Постанова НКРЕКП № 440 від 29.03.2019.
5. Thirumalai, C., Chandhini, S. A., & Vaishnavi, M. *Analysing the concrete compressive strength using Pearson and Spearman*. 2017 International Conference of Electronics, Communication and Aerospace Technology (ICECA), 2017, 215–218. doi: 10.1109/ICECA.2017.8212799.
6. NASA. *Prediction of Worldwide Energy Resources*. URL: <https://power.larc.nasa.gov/>.
7. Windy. URL: <https://www.windy.com/?gust,50.732,21.375,5,i:pressure>.
8. Венгрин І., Шаповал С. *Інтенсивність сонячної радіації у місті Львові*. Енергоефективність в будівництві та архітектурі, 2019, вип. 12, с. 77–84.
9. Аналіз нестабільності генерування відновлюваними джерелами енергії з урахуванням їх технічного стану.
10. *Impacts of Wind Farms on Power System Stability*.
11. Deutsche Energie-Agentur Dena (DENA). *Planning of the grid integration of wind energy in Germany onshore and offshore up to the year 2020*. 2005.

12. Hegazy Rezk, Abdul Ghani Olabi, Montaser Mahmoud, Tabbi Wilberforce, Enas Taha Sayed, Metaheuristics and multi-criteria decision-making for renewable energy systems: Review, progress, bibliometric analysis, and contribution to the sustainable development pillars, *Ain Shams Engineering Journal*, Volume 15, Issue 8, 2024, 102883, ISSN 2090-4479, <https://doi.org/10.1016/j.asej.2024.102883>.

13. Holttinen, H., et al. *State-of-the-art of design and operation of power systems with large amounts of wind power summary of IEA wind collaboration EWEC2007*. Proc. European Wind Energy Conf., 2007.

14. Deutsche Energie-Agentur Dena (DENA). *Planning of the grid integration of wind energy in Germany onshore and offshore up to the year 2020*. 2005.

15. Strbac, G., Shakoor, A., Black, M., Pudjianto, D., & Bopp, T. *Impact of wind generation on operation and development of the future UK electricity systems*. Electr. Power Syst. Res., 2007.

16. Lezhniuk P., Buslavets O., Rubanenko O. BALANSING OF POWER AND ELECTRICITY IN THE ELECTRIC POWER SYSTEM WITH RENEWABLE ENERGY SOURCES BY CRITERIONAL METHOD. *Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: Energy: Reliability and Energy Efficiency*. 2021. No. 1 (2). P. 62–70. URL: <https://doi.org/10.20998/2224-0349.2021.01.09> (date of access: 09.12.2024).

17. Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Енергетика: надійність та енергоефективність: зб. наук. пр. / Нац. техн. ун-т «Харків. політехн. ін-т». — Харків : НТУ «ХПІ», 2021. — № 1 (2) 2021 — 102 с. — ISSN2224-0349.

18. IRENA. *Electricity Storage and Renewables: Costs and Markets to 2030*. International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi, 2017.

19. Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Енергетика: надійність та енергоефективність: зб. наук. пр. / Нац. техн. ун-т

«Харків. політехн. ін-т». — Харків : НТУ «ХПІ», 2021. — № 1 (2) 2021 — 102 с. — ISSN2224-0349.

20. 19 ІНВЕСТИЦІЇ В АЛЬТЕРНАТИВНУ ЕНЕРГЕТИКУ: ЯК В УКРАЇНІ ЗАРОБЛЯЮТЬ НА БІОГАЗІ. *Get Market*. URL: <https://getmarket.com.ua/ua/news/investiciyi-v-al-ternativnu-energetiku-yak-v-ukrayini-zaroblyayut-na-biogazi> (дата звернення: 09.12.2024).

21. Lezhniuk P., Buslavets O., Rubanenko O. BALANSING OF POWER AND ELECTRICITY IN THE ELECTRIC POWER SYSTEM WITH RENEWABLE ENERGY SOURCES BY CRITERIONAL METHOD. *Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: Energy: Reliability and Energy Efficiency*. 2021. No. 1 (2). P. 62–70. URL: <https://doi.org/10.20998/2224-0349.2021.01.09> (date of access: 09.12.2024).

22. 20 Рубаненко О. О. Використання біоресурсів для компенсації нестабільності вітрових і сонячних електростанцій. *Вісник ХНТУСГ ім. Петра Василенка*, 2018, № 196, с. 8–9.

23. 21 Матвійчук В. А., Собчук Н. В., Рубаненко О. О. Використання локальних джерел електроенергії для оптимізації структури ЕЕС. *Вісник Хмельницького національного університету*, 2018, № 4, с. 208–214.

24. 22 Hamouda, N., et al. ANFIS Controller Design Using PSO Algorithm for MPPT of Solar PV System Powered Brushless DC Motor Based Wire Feeder Unit. 2020 International Conference on Electrical Engineering (ICEE), 2020, 1–6.

25. 23 Andrew-Cotter, J., Uddin, M. N., & Amin, I. K. Particle Swarm Optimization based Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System for MPPT Control of a Three-Phase Grid-Connected Photovoltaic System. 2019 IEEE International Electric Machines & Drives Conference (IEMDC), 2019, 2089–2094.

26. 24 Shinn, L. *Renewable Energy: The Clean Facts*. URL: <https://www.nrdc.org/stories/renewable-energy-clean-facts> (Дата звернення: 15.08.2020).

27. 25 Повноцінна енергетична біржа: як працює ринок "на добу наперед". URL: <https://www.epravda.com.ua/projects/promarket-energo/2019/12/12/654707/> (Дата звернення: 15.09.2020).

28. 26 URL: <https://ua.energy/zagalni-novyny/u-2020-rotsi-vstanovlena-potuzhnist-ves-ta-ses-zrosla-na-41-a-yihnya-chastka-u-strukturi-vyrobnytstva-elektroenergiyi-vdvichi/> (Дата звернення: 16.08.2020).

29. 27 Бондаренко Р. В., Довгалюк О. М., Омеляненко Г. В., Піротті О. Є., Сиромятнікова Т. В. *Підвищення надійності функціонування розподільних електричних мереж*. Вісник ХНТУСГ ім. Петра Василенка, 2018, вип. 195, с. 69

ДОДАТОК А

ПРОТОКОЛ ПЕРЕВІРКИ НАВЧАЛЬНОЇ (КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ) РОБОТИ

Назва роботи: «Аналіз методів та способів компенсації нестабільності генерування відновлюваних джерел енергії»

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., проф. кафедри ЕСС Лежнюк П. Д.

(прізвище, ініціали, посада)

Показники звіту подібності

Turnitin	
Оригінальність	
Загальна схожість	

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 _____
(підпис)

Щербатий Д. В.
(прізвище, ініціали)

Опис прийнятого рішення

Особа, відповідальна за перевірку _____
(підпис)

Вишневський С.Я
(прізвище, ініціали)

Експерт _____
(за потреби) (підпис)

_____ (прізвище, ініціали, посада)

ДОДАТОК Б

ТЕХНІЧНЕ ЗАВДАННЯ МКР
Міністерство освіти і науки України
Вінницький національний технічний університет
Факультет електроенергетики та електромеханіки
Кафедра електричних станцій і систем

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри ЕСС
д.т.н., професор Комар В.О.

_____ (підпис)
"_____" _____ 2024 р.

ТЕХНІЧНЕ ЗАВДАННЯ
на виконання магістерської кваліфікаційної роботи
«Аналіз методів та способів компенсації нестабільності генерування
відновлювальних джерел енергії»
08-21.МКР.022.00.006 ТЗ

Науковий керівник: к.т.н., проф.
каф. ЕСС

_____ Лежнюк П. Д.

Студент групи 2ЕСМ-23м
_____ Грогуль А. С.

Вінниця 2024 р.

1. Підстава для виконання магістерської кваліфікаційної роботи (МКР)

а) актуальність роботи обумовлена зростанням частки ВДЕ у світовій енергетиці та необхідністю забезпечення стабільності енергопостачання. Нестабільність генерації відновлювальних джерел, таких як сонячна та вітрова енергетика, вимагає впровадження ефективних методів компенсації для підтримання балансу енергосистем. Дослідження цієї теми є важливим кроком у напрямку розвитку сталих енергетичних технологій, зниження залежності від викопних палив і досягнення енергетичної незалежності в умовах сучасних кліматичних та економічних викликів.

б) наказ № 310 від 17 вересня 2024 про затвердження теми магістерської кваліфікаційної роботи.

2. Мета і призначення МКР

а) мета – даної роботи є проведення аналізу різних способів та методів компенсації нестабільності генерування відновлюваних джерел енергії;

б) призначення розробки – виконання магістерської кваліфікаційної роботи.

3. Вихідні дані для виконання МКР

Список використаних джерел розробки:

1. 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.
2. Лежнюк П. Д., Рубаненко О. О. Нормування втрат електроенергії в електричних мережах агропромислового комплексу критеріальним методом з застосуванням нейронного моделювання. Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут» Серія «Нові рішення в сучасних технологіях». 2016. № 18 (1190). С. 60 – 65.

4. Вимоги до виконання МКР

У роботі розглянуто наступні питання.

- Огляд літератури з питань компенсації нестабільності генерування ВДЕ;
- Визначення основних недоліків, які спричиняють нестабільність ВДЕ.
- Дослідження методу критеріального програмування
- Розробка моделі критеріального програмування для забезпечення балансу енергії в системах із ВДЕ

- Заходи забезпечення надійності та безпечної експлуатації електроустановок.

5. Етапи МКР та очікувані результати

№ з/п	Назва етапів магістерської кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи		При- мітка
		початок	кінець	
1.	Формування та затвердження теми МКР	17.09.24	17.09.24	
2.	Вступ. Огляд літературних джерел	21.09.24	24.09.24	
3.	1 Потреба компенсації генерування негарантованих джерел енергії	24.09.24	29.09.24	
4.	2 Переваги та практичне застосування методу критеріального програмування у задачах відновлювальних джерел енергії	30.09.24	10.10.24	
5.	3 Критеріальний метод у забезпеченні балансу енергії в системах з вде.	11.10.24	28.10.24	
6.	4 Заходи забезпечення надійної та безпечної експлуатації електроустановок	29.10.24	05.11.24	
7.	Формування висновків по роботі	06.11.24	12.11.24	
8.	Оформлення пояснювальної записки	13.11.24	21.11.24	
9.	Виконання графічної частини та оформлення презентації	22.11.24	27.11.24	
10.	Перевірка МКР на плагіат. Попередній захист МКР	28.11.24	01.12.24	
11.	Рецензування МКР	01.12.24	04.12.24	
12.	Формування та затвердження теми МКР	17.09.24	17.09.24	

6. Матеріали, що подаються до захисту МКР

Пояснювальна записка МКР, ілюстративні матеріали, протокол попереднього захисту МКР на кафедрі, відгук наукового керівника, відгук опонента, анотації до МКР українською та іноземною мовами, довідка про відповідність оформлення МКР діючим вимогам.

7. Порядок контролю виконання та захисту МКР

Виконання етапів розрахункової документації МКР контролюється науковим керівником згідно зі встановленими термінами. Захист МКР відбувається на засіданні Державної екзаменаційної комісії, затвердженою наказом ректора.

8. Вимоги до оформлення МКР

Вимоги викладені в «Положенні про кваліфікаційні роботи на другому (магістерському) рівні вищої освіти. СУЯ ВНТУ-03.02.02-П.001.01:21 / уклад.: А. О. Семенов, Л. П. Громова, О. В. Сердюк, Т. В. Макарова. Вінниця: ВНТУ, 2021. 60 с.

9. Вимоги щодо технічного захисту інформації в МКР з обмеженим доступом

Відсутні.

ДОДАТОК В

Ілюстративна частина «Аналіз методів та способів компенсації нестабільності генерування відновлюваних джерел енергії»

Аналіз методів та способів компенсації нестабільності генерування відновлюваних джерел енергії

Виконав:

студент групи 2ЕЕ-196

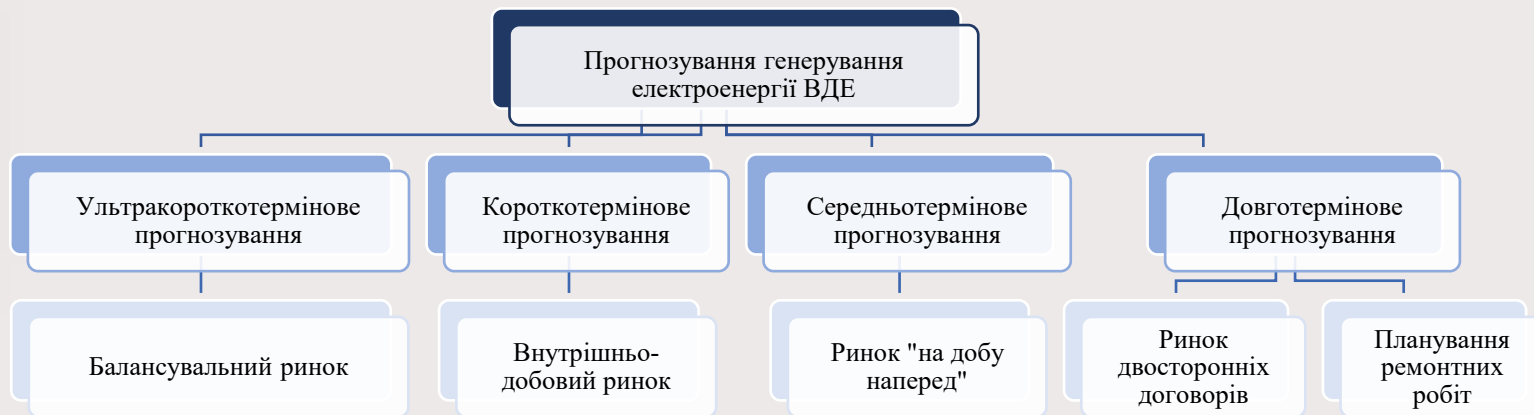
Щербатий Д. В.

Керівник:

д.т.н., професор

Лежнюк П. Д.

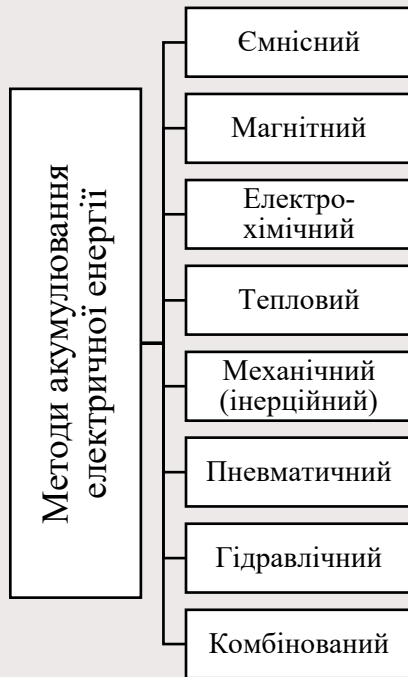
Класифікація задач прогнозування генерування електроенергії ВДЕ в залежності від використання прогнозованих даних



Види відновлювальних джерел енергії



Компенсація нестабільності ВДЕ



Метод критеріального програмування

$$\sum_{i=1}^n \omega_i \cdot |f_i(x) - g_i| \rightarrow \min$$

де $f_i(x)$ — значення i -го критерію, g_i — цільове значення, ω_i — ваговий коефіцієнт.

Переваги
методу:

Універсальність

Гнучкість

Простота реалізації

Автоматизація

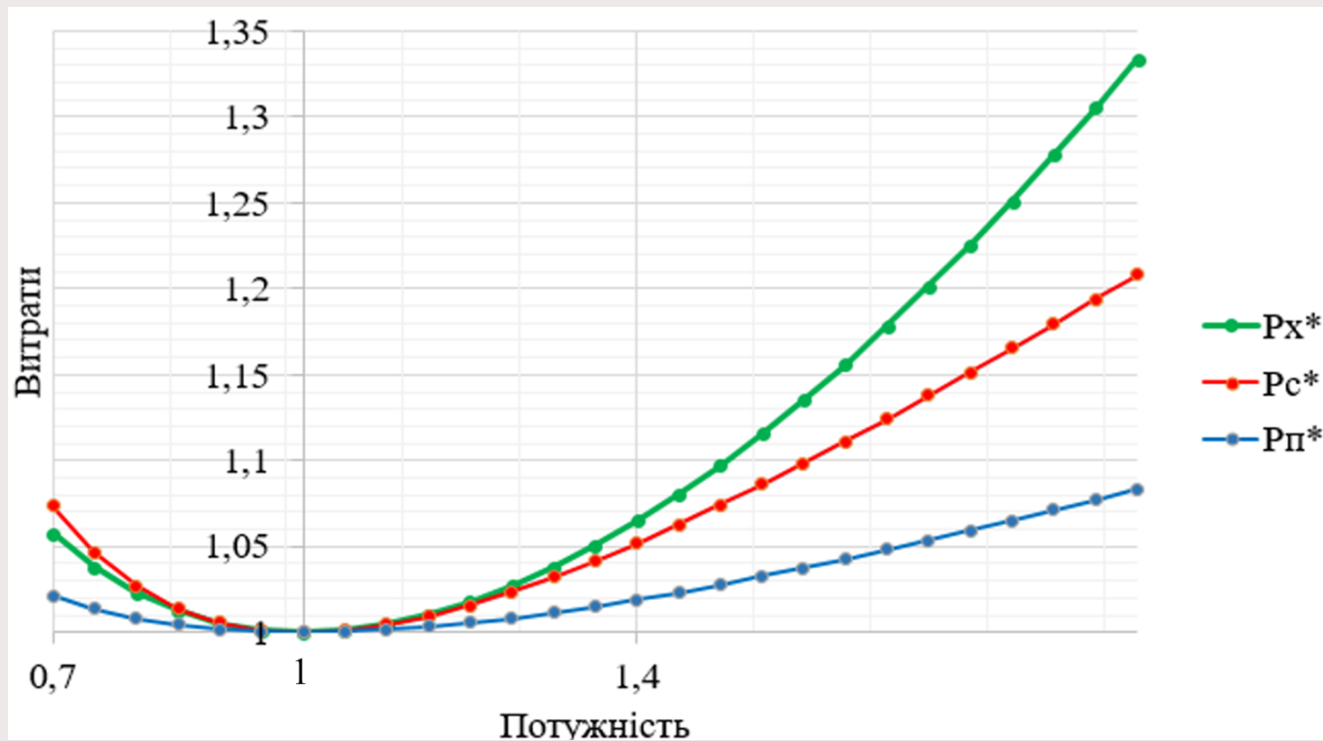
Екологічна та економічна ефективність

Системний підхід до компенсації коливань генерації ВДЕ

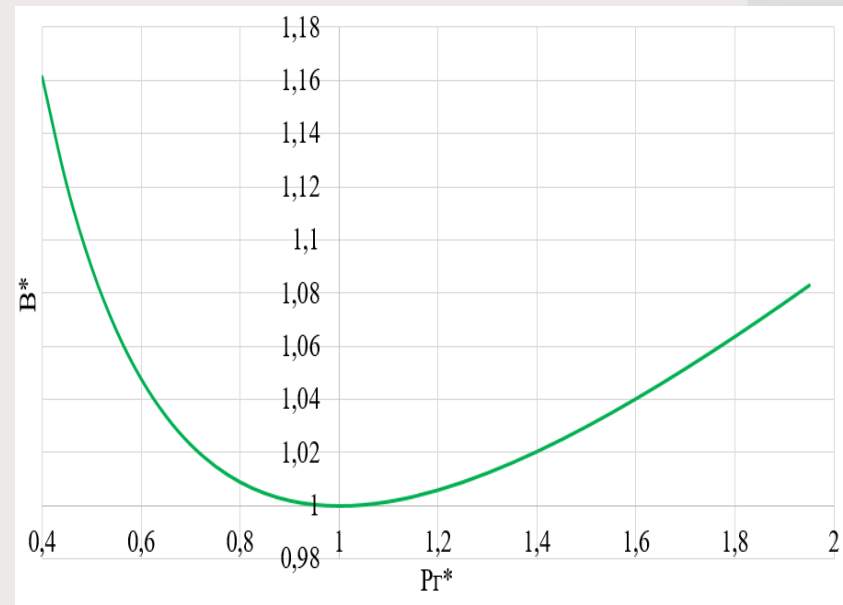
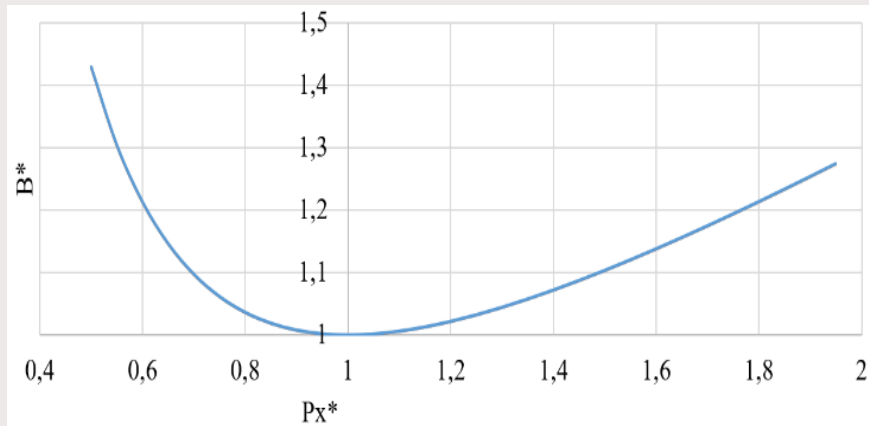
$$B_{\Sigma} = B_x(P_x) + B_e(P_e) + B_z(P_z) + B_c(P_c) + B_n(P_n) \rightarrow \min$$

де $B_x(P_x)$ – витрати на резервування накопичувачами хімічного типу; $B_e(P_e)$ – витрати на водневі технології; $B_z(P_z)$ – витрати, зв'язані з використанням біогазових технологій як резерву; $B_c(P_c)$ – витрати на користування системним резервом

Критеріальна модель питомих витрат на резервування при використанні хімічних накопичувачів



Критеріальна модель питомих витрат на резервування за сценарієм при використанні хімічних накопичувачів і біогазових установок



Дякую за увагу!