

Вінницький національний технічний університет

Факультет електроенергетики та електромеханіки

Кафедра електричних станцій і систем

Бакалаврська кваліфікаційна робота на тему:

**ДОСЛІДЖЕННЯ НАКОПИЧУВАЧІВ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ ЯК ЗАСОБУ
БАЛАНСУВАННЯ ГРАФІКІВ НАВАНТАЖЕННЯ**

Виконав: студент 4 курсу, групи ЕС-216
спеціальності 141 – «Електроенергетика,
електротехніка та електромеханіка»
за ОП «Електричні станції»,
Бордюг Ю.О.

Керівник: к.т.н., доц., доцент каф. ЕСС
Вишневський С. Я.

« 03 » 06 2025 р.

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

ЕССЕМ Давиденко О.В.

« 09 » 06 2025 р.

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

« 06 » 06 2025 р.

Вінниця ВНТУ 2025 рік

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

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри ЕСС

д.т.н., професор Комар В. О.

«20» жовтня 2025 р.

З А В Д А Н Н Я

НА БАКАЛАВРСЬКУ КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ СТУДЕНТУ

Бордюг Юлії Олександрівні.
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи «Дослідження накопичувачів електроенергії як засобу балансування графіків навантаження»

Керівник роботи к.т.н., доц., доцент каф. ЕСС Вишневський С.Я.

затверджена наказом вищого навчального закладу від 20.03.2025 №97

2. Термін подання студентом роботи 03 червня 2025 року

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

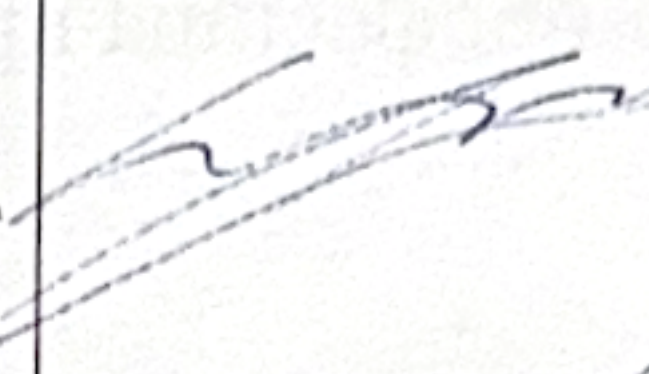
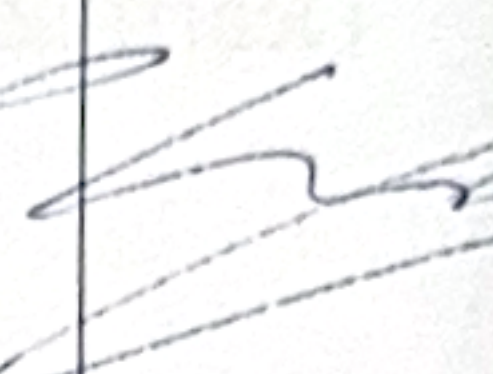
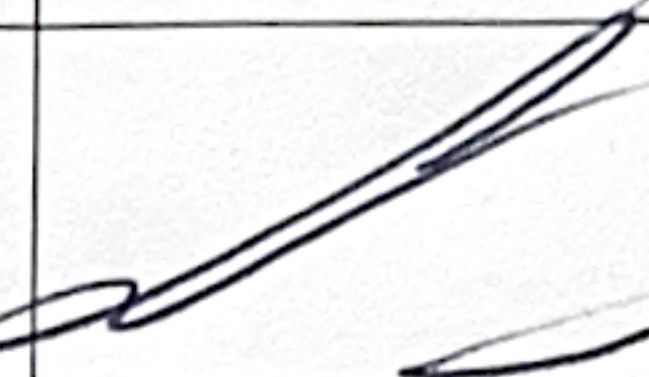
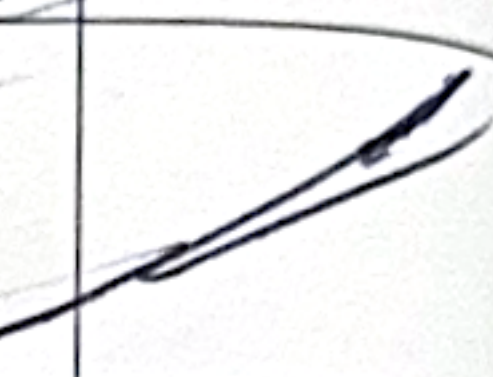
1. Правила улаштування електроустановок. – Видання офіційне. Міненерговугілля України. – Х. : Видавництво «Форт», 2017. – 760 с. 2. «ПТЕ Технічна експлуатація електричних станцій та мереж.» 3. Електричні системи і мережі. Частина 1: навчальний посібник / Ю. В. Малогулко, О. Б. Бурикін, Т. Л. Кацадзе, В. В. Нетребський. Вінниця : ВНТУ, 2020. 203 с.

4. Зміст текстової частини: Перелік скорочень. Вступ. 1. РОЗДІЛ ЗАГАЛЬНЕ ЗНАЧЕННЯ ВІДНОВЛЮВАНИХ ДЖЕРЕЛ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ В ОЕС. 2. ЗАСТОСУВАННЯ ЛІТІЙ-ІОННИХ НАКОПИЧУВАЧІВ HUAWEI TECHNOLOGIES В ПРОЕКТІ. 3. ЕКОНОМІЧНЕ ОБГРУНТУВАННЯ ВИКОРИСТАННЯ НАКОПИЧУВАЧІВ. 4. Розділ Охорона праці. Висновки. Список використаних джерел. Додатки.

5. Перелік ілюстративного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень) 1. Типовий добовий графік навантаження енергосистеми і його покриття електростанціями. 2. Напрями енергетичної диверсифікації. 3. Встановлена потужність ОЕС України та частка відновлюваної енергії у генерації та встановленій потужності 4. Усереднений річний графік видачі потужності СЕС. 5. Класифікація систем зберігання енергії. 6. Будова УЗЕ та шафи збору потужності. 7. План території об'єкту та головна електрична

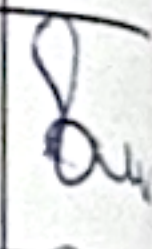
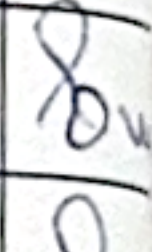
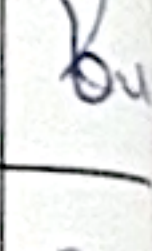
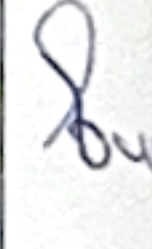
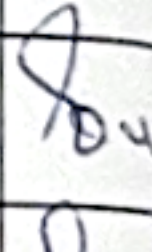
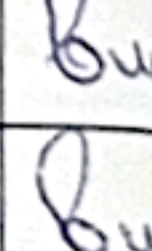
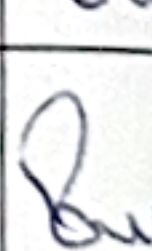
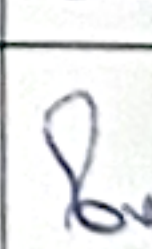
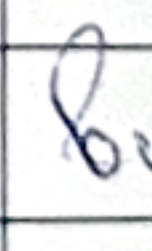
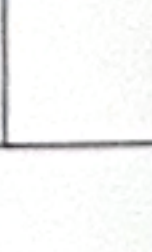
схема КТП-10/0,8-6300 кВА. 8. Структура лібералізованого ринку
електричної енергії.

6. Консультанти розділів роботи

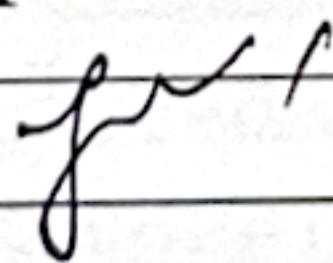
Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	виконання прийняв
Спеціальна частина	Керівник роботи Вишневський С.Я. к.т.н., доц., доцент кафедри ЕСС		
Охорона праці	Кобилянський О.В. д. пед. н., проф., завідувач каф.		

7. Дата видачі завдання 20 березня 2025 року

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва та зміст етапів	Термін виконання етапів роботи		Примітки
		початок	кінець	
1	Формування та затвердження теми БКР	16.03.2025	17.03.2025	
2	Вступ. Огляд літературних джерел	18.03.2025	20.03.2025	
4	Теоретичні основи накопичувачів електроенергії	01.04.2025	06.04.2025	
5	Вибір обладнання для систем зберігання енергії та економічне обґрунтування їх застосування	19.04.2025	25.04.2025	
6	Виконання розділу охорони праці	26.04.2025	30.04.2025	
7	Формування висновків по роботі	01.05.2025	09.05.2025	
8	Оформлення пояснювальної записки	15.05.2025	20.05.2025	
9	Виконання графічної частини та оформлення презентації	21.05.2025	30.05.2025	
10	Перевірка БКР на плагіат. Попередній захист БКР	04.06.2025	05.06.2025	
11	Рецензування БКР	07.06.2025	09.06.2025	
	Захист БКР	10.06.2025	13.06.2025	

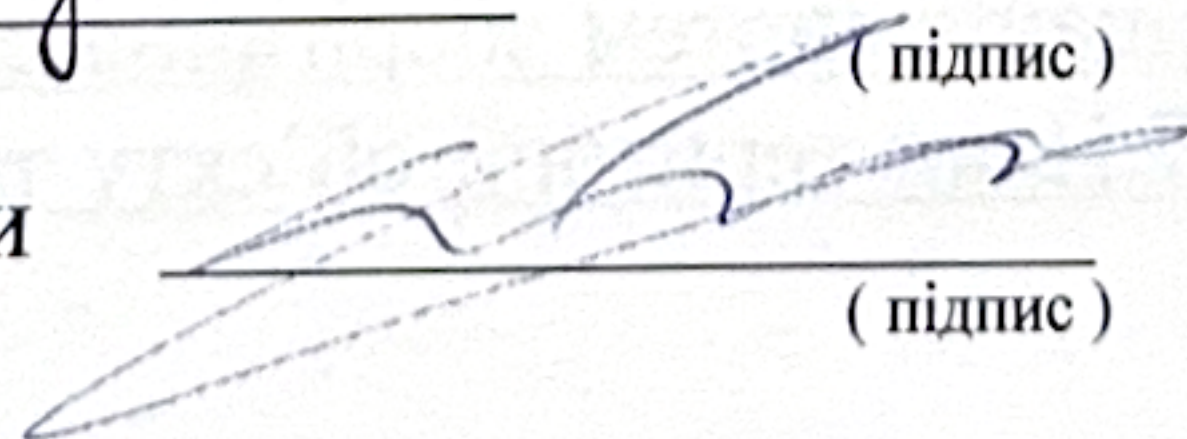
Студент



(підпис)

Бордюг Ю.О.

Керівник роботи



(підпис)

Вишневський С.Я

АНОТАЦІЯ

УДК 621.311

Бордюг Юлія Олександрівна. «Дослідження накопичувачів електроенергії як засобу балансування графіків навантаження». Бакалаврська кваліфікаційна робота. – Вінниця: ВНТУ. – 2025. – 99 с. Бібліогр.: 26. Рис. : 30. Табл. : 11.

Досліджено роль та ефективність застосування систем зберігання енергії як засобу балансування добових графіків навантаження в умовах функціонування об'єднаної енергосистеми України з урахуванням зростаючого впливу відновлюваних джерел енергії. Проведено аналіз впливу джерел відновлювальної енергетики на стабільність параметрів електроенергетичної системи, зокрема частоти, яка є ключовим показником якості електроенергії та надійності енергопостачання.

Особливу увагу приділено технічним аспектам використання сучасних накопичувачів електроенергії, здатних акумулювати надлишки генерованої потужності в умовах небалансів виробітку та споживання. Розглянуто можливість оперативної участі таких систем у регулюванні частоти та балансі активної потужності в режимах реального часу

Наголошено на можливості підвищення економічної ефективності експлуатації таких систем завдяки виходу об'єкта генерації на балансуючий ринок електроенергії. Запропоновано рекомендації щодо оптимізації конфігурацій подібних енергетичних об'єктів з урахуванням ринкових механізмів та режимних особливостей ОЕС України.

Ключові слова: відновлювальна енергетика, системи зберігання енергії, небаланси, частота, активна потужність.

ABSTRACT

UDC 621.311

Bordyuh Yulia Oleksandrivna. *"Investigation of Energy Storage Systems as a Means of Load Curve Balancing."* Bachelor's Qualification Thesis. – Vinnytsia: VNTU. – 2025. – 99 p. Bibliography: 26 sources. Figures: 30. Tables: 11.

The thesis investigates the role and effectiveness of energy storage systems as a means of balancing daily load curves under the operating conditions of the Unified Power System (UPS) of Ukraine, taking into account the increasing impact of renewable energy sources. The influence of renewable generation on the stability of power system parameters is analyzed, with particular emphasis on frequency – a key indicator of electricity quality and supply reliability.

Special attention is paid to the technical aspects of using modern energy storage systems capable of accumulating excess generated power during imbalances between production and consumption. The possibility of real-time participation of such systems in frequency regulation and active power balancing is examined.

The thesis highlights the potential for improving the economic efficiency of operating such systems by integrating renewable generation facilities into the electricity balancing market. Recommendations are provided for optimizing the configuration of such energy facilities, taking into account market mechanisms and operational characteristics of the UPS of Ukraine.

Keywords: renewable energy, energy storage systems, imbalances, frequency, active power.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ	5
ВСТУП	6
1 РОЗДІЛ ЗАГАЛЬНЕ ЗНАЧЕННЯ ВІДНОВЛЮВАНИХ ДЖЕРЕЛ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ В ОЕС	8
1.1 Баланс в ОЕС	9
1.2 ВДЕ як частина ОЕС.....	16
1.3 Вплив ВДЕ на баланс електроенергії в ОЕС	25
1.4 Системи зберігання електроенергії	28
2 ЗАСТОСУВАННЯ ЛІТІЙ-ІОННИХ НАКОПИЧУВАЧІВ HUAWEI TECHNOLOGIES В ПРОЕКТІ	54
2.1 Опис ідеї застосування накопичувачів в проекті	54
2.2 Загальна інформація про літєві накопичувачі електроенергії Huawei Technologies	55
2.3 Розрахунок обладнання КТП.....	61
3 ЕКОНОМІЧНЕ ОБГРУНТУВАННЯ ВИКОРИСТАННЯ НАКОПИЧУВАЧІВ	74
3.1 Місце ВДЕ на ринку електричної енергії	74
3.2 Економічна ідея застосування накопичувачів електричної енергії.....	78
3.3 Обґрунтування додаткової стимуляції використання накопичувачів електричної енергії	80
4 ОХОРОНА ПРАЦІ.....	83
4.1 Технічні рішення з безпечної експлуатації обладнання	84
4.1.1 Технічні рішення з безпечної організації робочих місць.....	84
4.1.2 Електробезпека.....	87
4.2 Технічні рішення з гігієни праці і виробничої санітарії	89
4.2.1 Мікроклімат.....	89
4.2.2 Склад повітря робочої зони.....	90

4.2.3 Виробниче освітлення.....	90
4.2.4 Виробничий шум.....	91
4.3. Пожежна безпека.....	92
ВИСНОВКИ.....	95
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	97
ДОДАТОК А Протокол перевірки навчальної роботи.....	100
ДОДАТОК Б.....	101

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ

АЕС	атомна електрична станція
БР	балансуючий ринок
ВДЕ	відновлювані джерела енергії
ВЕС	вітрова електрична станція
ГАЕС	гідроаккумулятивна електрична станція
ГТУ	газотурбінна електрична станція
КЕС	конденсаційна електрична станція
ККД	коефіцієнт корисної дії
КТП	комплектна трансформаторна підстанція
ЛЕП	лінія електропередавання
ОЕС	об'єднана електроенергетична система
ОСП	оператор системи передачі
ОСР	оператор системи розподілу
РГ	розподілене генерування
СЕС	сонячна електрична станція
ТВП	трансформатор власних потреб
ТЕЦ	теплоелектро цетраль
УЗЕ	установка зберігання енергії

ВСТУП

Актуальність теми дослідження.

Стрімкий розвиток відновлюваної енергетики протягом останніх років спричинив суттєве зростання кількості генеруючих об'єктів, що працюють на основі відновлюваних джерел енергії (ВДЕ). Висока екологічна привабливість такої генерації, зокрема її мінімальний вплив на довкілля, сприяла активній державній підтримці інвестиційних проєктів у сфері ВДЕ.

Значна частка електроенергії відновлюваної генерації надходить в енергомережу від фотоелектричних та вітрових електростанцій. Особливість їхньої роботи полягає у залежності виробітку електроенергії від метеорологічних умов, що зумовлює необхідність постійного прогнозування обсягів генерації та споживання. Похибки прогнозування, обумовлені динамічністю погодних явищ, призводять до виникнення небалансів потужності в енергосистемі, що, у свою чергу, знижує стабільність її роботи.

Порушення балансу між виробництвом і споживанням електроенергії зумовлює відхилення частоти від номінального значення, зміну вузлових напруг та може спричинити порушення оптимального режиму функціонування енергосистеми. Такі зміни негативно впливають на надійність та якість електропостачання, а також на ефективність технологічних процесів у промисловості. Для корекції подібних небалансів використовуються маневрові джерела генерації, зокрема гідроакумуючі електростанції (ГАЕС), що здатні оперативно змінювати свою потужність у відповідь на динаміку навантаження.

Згідно з напрямками стратегічного розвитку паливно-енергетичного комплексу України, очікується суттєве збільшення частки ВДЕ в структурі генерації об'єднаної енергосистеми (ОЕС). У зв'язку з цим прогнозується зростання обсягів небалансів потужності, спричинених нестабільністю відновлюваної генерації. Це формує необхідність пошуку нових підходів до забезпечення балансування системи, зокрема через впровадження сучасних систем зберігання енергії (СЗЕ).

Мета і завдання дослідження.

Метою роботи є комплексне дослідження впливу генерації з відновлюваних джерел на режим роботи енергосистеми та обґрунтування техніко-економічної доцільності застосування СЗЕ для згладжування добових графіків навантаження. Серед основних завдань:

- аналіз впливу ВДЕ на баланс активної потужності та частоту в енергосистемі;
- дослідження технічних можливостей різних типів накопичувачів енергії;
- моделювання сценаріїв їх застосування на основі реальних режимів генерації СЕС;
- оцінка економічної ефективності впровадження СЗЕ з точки зору роботи на балансуєчому ринку електроенергії.

Актуальні підходи.

Сьогодні існує цілий спектр технологій накопичення енергії, що відрізняються за рівнем енергетичної ефективності, вартістю реалізації, масштабованістю та специфікою застосування. Впровадження таких систем дозволяє реалізовувати функцію гнучкого регулювання потужності в енергосистемі, а також підтримувати частоту в допустимих межах. З огляду на сучасні технологічні тренди та тенденцію до здешевлення акумуляторних систем, перспективним є розгляд СЗЕ як інтегрального компонента сучасної електроенергетичної інфраструктури.

Об'єкт і предмет дослідження

Об'єктом дослідження є фотоелектрична електростанція, оснащена системою накопичення енергії.

Предметом дослідження є принципи і методи компенсації небалансів потужності від ВДЕ за допомогою СЗЕ.

Наукова новизна отриманих результатів.

Новизна полягає у розробці підходів до техніко-економічного обґрунтування доцільності використання СЗЕ у поєднанні з ВДЕ для участі на балансуєчому ринку та підтримки частотної стабільності енергосистеми.

Особистий внесок здобувача.

Усі положення, висновки та результати, що складають науково-практичну цінність дослідження, отримані автором самостійно, в межах виконання кваліфікаційної роботи.

1 РОЗДІЛ ЗАГАЛЬНЕ ЗНАЧЕННЯ ВІДНОВЛЮВАНИХ ДЖЕРЕЛ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ В ОЕС

1.1 Баланс в Об'єднаній енергетичній системі (ОЕС)

Однією з фундаментальних особливостей функціонування електроенергетичної системи, яка суттєво вирізняє її серед інших галузей економіки, є постійна необхідність підтримання динамічного балансу між виробництвом та споживанням електричної енергії. Інакше кажучи, в будь-який, навіть нескінченно малий, інтервал часу повинна дотримуватися рівність між генерацією електроенергії та її споживанням, з урахуванням втрат при її передачі та розподілі [1]. Це положення можна математично представити співвідношенням:

$$P_{\text{вир}} = P_{\text{спож}} + P_{\text{втрат}}, \quad (1.1)$$

де:

$P_{\text{вир}}$ — миттєва потужність, що виробляється електростанціями;

$P_{\text{спож}}$ — споживана потужність;

$P_{\text{втрат}}$ — втрати в мережі.

У випадку інтегральної форми балансу, вираженої через електроенергію за певний інтервал часу Δt :

$$E_{\text{вир}}(\Delta t) = E_{\text{спож}}(\Delta t) + E_{\text{втрат}}(\Delta t) \quad . \quad (1.2)$$

Недотримання вказаного енергетичного балансу призводить до розбалансування енергосистеми, що викликає відхилення частоти від номінального значення, а також порушення напруги в окремих вузлах мережі. Зміна частоти є критичним фактором, який безпосередньо впливає на надійність функціонування енергосистеми. У документах, що регламентують параметри якості електроенергії, встановлено такі межі допустимих відхилень частоти [2]:

Нормальне відхилення частоти: $\pm 0.2 \text{ Гц}$ від номінального значення;

Граничне (максимально допустиме) відхилення частоти: $\pm 0.4 \text{ Гц}$ від 0.4.

Зазначені межі стосуються нормального (стаціонарного) режиму роботи. У післяаварійних режимах допускаються тимчасові перевищення вказаних норм, однак вони потребують швидкої стабілізації системи.

Жорсткі вимоги до стабільності частоти пояснюються її критичним впливом на електротехнічне обладнання та виробничі процеси. Наприклад, зниження частоти викликає зменшення швидкості обертання електродвигунів, що у свою чергу знижує продуктивність механізмів, пов'язаних з ними. Крім того, зміна частоти впливає на втрати потужності в електричних мережах, а також спричиняє перегрів сталевих елементів магнітних систем (трансформаторів, реакторів, електродвигунів), що знижує їх довговічність через збільшення намагнічувальних струмів та додатковий тепловий знос.

1.1 Баланс в ОЕС

Однією з фундаментальних особливостей функціонування електроенергетичної системи, яка принципово відрізняє її від інших секторів економіки, є необхідність постійного забезпечення рівноваги між обсягами виробленої та спожитої електричної енергії. Це означає, що в кожен, навіть нескінченно малий проміжок часу, має бути дотримана енергетична рівновага між генеруванням електроенергії та її споживанням, включаючи втрати, що виникають у процесах її передачі та розподілу. Така умова є критичною для стабільного й надійного функціонування об'єднаної енергосистеми.

$$\Sigma P_r = \Sigma P_c = \Sigma P_n + \Sigma \Delta P_b, \quad (1.1)$$

$$\Sigma Q_r = \Sigma Q_c = \Sigma Q_n + \Sigma \Delta Q_b \quad (1.2)$$

Недотримання балансу електричної енергії спричиняє відхилення від нормального режиму роботи електроенергетичної системи. Зокрема, порушення балансу активної потужності безпосередньо впливає на частоту

— один із ключових параметрів, що характеризує якість електроенергії та визначає ефективність і надійність функціонування енергосистеми. Для забезпечення нормативної якості електроенергії використовуються регламентовані межі частоти, встановлені чинними нормативними документами. Згідно з ними, нормальне відхилення частоти допускається в межах $\pm 0,2$ Гц, а граничне — в межах $\pm 0,4$ Гц відносно номінального значення [2]:

- нормальне відхилення – в межах $\pm 0,2$ Гц,
- граничне відхилення – в межах $\pm 0,4$ Гц.

Наведені допустимі межі відхилення частоти стосуються виключно нормального режиму роботи енергосистеми та не застосовуються до післяаварійних станів. Така суворість вимог пояснюється критичним впливом частоти на режими функціонування електрообладнання і на перебіг технологічних процесів у споживачів. Зокрема, зниження частоти в енергосистемі зумовлює зменшення швидкості обертання електродвигунів, що призводить до зниження продуктивності відповідних механізмів. Окрім того, погіршення частотного режиму спричиняє зростання втрат електроенергії у мережах.

Зниження частоти також негативно впливає на довговічність обладнання, яке містить феромагнітні компоненти, зокрема електродвигуни, трансформатори та реактори із сталевими магнітопроводами. Це пояснюється підвищенням струмом намагнічування і, відповідно, додатковим нагрівом сталевих сердечників. Причиною зниження частоти, як правило, є дефіцит генерованої активної потужності, коли її обсяг менший за рівень потужності, що споживається.

$$\Sigma P_r < \Sigma P_c . \quad (1.3)$$

Збільшення частоти навпаки виникає внаслідок зменшення обсягів споживаної активної потужності, коли її значення менше ніж значення активної потужності, що генерується:

$$\Sigma P_r > \Sigma P_c . \quad (1.4)$$

Баланс реактивної потужності впливає на рівень напруги в мережі. Якщо згенерована реактивна потужність більша ніж та, що споживається:

$$\Sigma Q_r > \Sigma Q_c , \quad (1.5)$$

то напруга в мережі знижується.

Відхилення рівня напруги від номінального значення чинить суттєвий негативний вплив на функціонування електротехнічного обладнання споживачів, зокрема систем освітлення, електродвигунів та електроприводів. Зниження напруги призводить до передчасного зносу ламп, зниження ефективності роботи електроприводу, оскільки момент обертання ротора прямо пропорційний прикладеній напрузі. У разі підвищення напруги збільшується ризик аварійних ситуацій та скорочується термін експлуатації обладнання.

Регулювання частоти в електричній мережі здійснюється шляхом балансування обсягів генерації та споживання активної потужності. Підтримка частоти в межах, визначених нормативними документами, є насамперед технічною задачею, яка вирішується шляхом введення резервних генеруючих потужностей у складі енергетичних підприємств.

Зростання частоти зазвичай є наслідком різкого скидання навантаження, що трапляється нечасто під час усталеного режиму роботи мережі, і ліквідується через зменшення потужності генераторів або їх часткове вимкнення. У разі ж зниження частоти повернення до номінального значення досягається шляхом збільшення обсягів генерації

активної потужності, тобто мобілізацією резервів або за допомогою автоматичного частотного розвантаження (АЧР).

Мобілізація резерву передбачає збільшення відпуску енергії генераторами, що досягається за допомогою автоматичного регулювання швидкості обертання турбіни через зміну витрати енергоносія (води чи пари). Такий тип регулювання відомий як первинне регулювання частоти і забезпечує стабільність частоти в системі, утримуючи її в допустимих межах у випадках порушення загального балансу потужності, незалежно від причини.

У ситуаціях, коли резерв регулюючих потужностей вичерпано, а частота не досягає номінального рівня, застосовується АЧР — автоматичне частотне розвантаження. Його призначення — швидке відновлення балансу потужності в умовах дефіциту активної електричної енергії. Це досягається шляхом поетапного відключення споживачів, починаючи з менш відповідальних (третя категорія), для яких відключення не пов'язане зі значними матеріальними чи техногенними наслідками. В останню чергу здійснюється відключення споживачів першої категорії, енергопостачання яких критично важливе і порушення якого може спричинити загрозу для життя людей, порушення безперервних технологічних процесів, значні економічні втрати або екологічні ризики [3].

У разі зниження частоти в енергосистемі на величину Δf відбувається спрацювання реле частоти, яке входить до складу пристроїв автоматичного частотного розвантаження (АЧР). Це ініціює поетапне вимкнення частини споживачів електроенергії з метою недопущення подальшого зниження частоти нижче критичної межі, яка для надійної роботи технологічного обладнання електростанцій встановлена на рівні 46 Гц.

Для подальшого регулювання частоти в системі, коли дії первинного регулювання або АЧР виявляються недостатніми, застосовують вторинне регулювання частоти. Його функцією є відновлення номінального значення

частоти та забезпечення планового режиму перетоків електроенергії між окремими енергосистемами. Завданням вторинного регулювання є корекція активної потужності на спеціально призначених електростанціях з метою компенсації небалансів, розвантаження перевантажених транзитних ліній, стабілізації частоти, підтримання заданих режимів міжсистемних перетоків, а також відновлення потужностей резервів, витрачених на первинне регулювання.

Згідно з вітчизняними технічними стандартами, створюється так званий вторинний резерв регулювання, величина якого визначається максимально можливою зміною потужності одного агрегату, електростанції або всієї об'єднаної енергосистеми. Вторинне регулювання може здійснюватись автоматично за допомогою регуляторів частоти або вручну оперативним персоналом, який орієнтується на покази приладів.

Регулювання реактивної потужності, на відміну від активної, здійснюється шляхом генерації додаткової реактивної енергії як самими генераторами, так і спеціальними компенсуючими пристроями. До них належать батареї конденсаторів, синхронні компенсатори та статичні джерела реактивної потужності (ДРП), які зазвичай встановлюються на підстанціях електричних мереж. Ефективність регулювання реактивної потужності залежить від раціонального розміщення ДРП безпосередньо поблизу місць її споживання, що дозволяє зменшити перетоки реактивної потужності через повітряні лінії електропередачі та трансформатори.

Забезпечення стабільної частоти в енергосистемі досягається участю кількох спеціально виділених електростанцій. Ці станції реагують на будь-які зміни сумарного навантаження в системі, автоматично змінюючи свою потужність відповідно до відхилення поточного балансу між виробництвом та споживанням електроенергії.

Типовий добовий графік навантаження енергосистеми характеризується наявністю трьох зон: базової, пікової та напівпікової. Ці зони визначають основні періоди зміни навантаження протягом доби й

мають вирішальне значення для планування режимів роботи генераторів. Типова форма такого графіка наведена на рисунку 1.1.

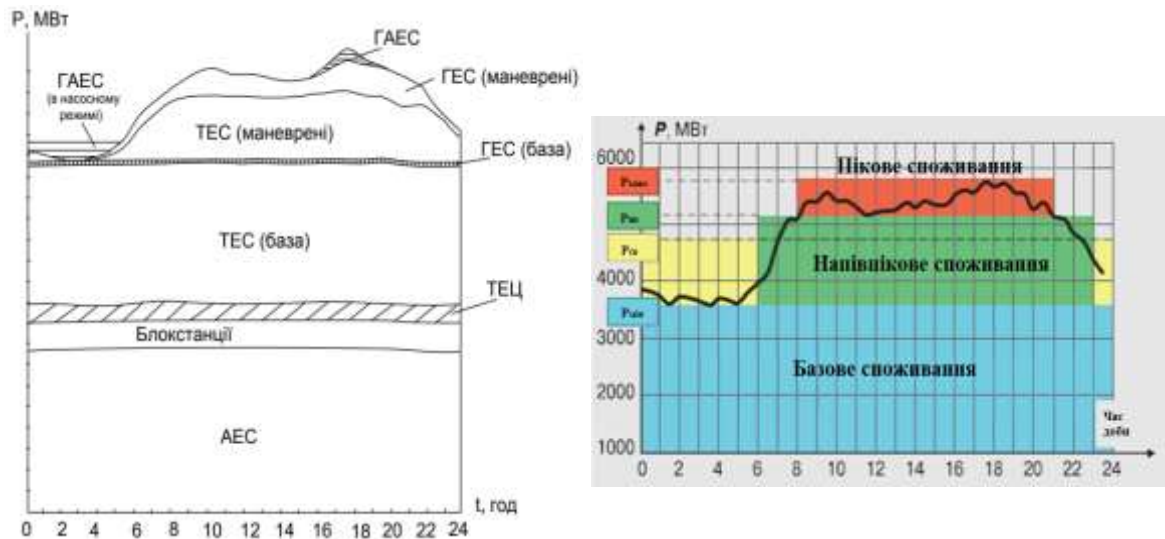


Рисунок 1.1 Типовий добовий графік навантаження енергосистеми і його покриття електростанціями

Електростанції, які забезпечують базову частину добового графіка навантаження, функціонують у безперервному режимі, підтримуючи постійне навантаження протягом більшої частини року. У цій зоні, як правило, працюють атомні електростанції (АЕС), високоекономічні конденсаційні електростанції (КЕС), а також теплоелектроцентралі (ТЕЦ), що експлуатуються відповідно до теплового графіка. Такі об'єкти характеризуються високим коефіцієнтом використання встановленої потужності та призначені для тривалої роботи з максимальною стабільністю параметрів.

Напівпікова частина графіка навантаження, яка відповідає періодам зростання або зменшення споживання протягом доби, покривається КЕС, що функціонують у змінному режимі. За потреби їх переводять на знижену

потужність або виводять у резерв у моменти зменшення навантаження. Ці електростанції виконують роль резервних джерел потужності, згладжуючи добові флуктуації попиту, забезпечують стабільність напруги в мережі та сприяють зменшенню загальної вартості виробленої електроенергії.

Пікові навантаження, що виникають протягом найбільш інтенсивних періодів доби, покриваються електростанціями з високою маневровістю, зокрема гідроелектростанціями (ГЕС), гідроакумлювальними електростанціями (ГАЕС) та газотурбінними установками (ГТУ). Вони вводяться в роботу переважно в пікові години, коли навантаження значно перевищує середньодобовий рівень. На відміну від базових електростанцій, конструкція яких не дозволяє гнучко змінювати потужність у реальному часі, пікові потужності мають значний регулювальний діапазон, здатність до швидкої синхронізації з мережею та високі швидкості навантаження. Наприклад, запуск гідроагрегатів ГЕС у турбінному режимі з повним набором потужності можливий протягом 1–2 хвилин з повної зупинки або за 15–30 секунд у разі холостого обертання. Повна зупинка або зміна потужності агрегата може тривати лише декілька секунд, що забезпечує високий рівень оперативності.

ГАЕС є багатофункціональними енергетичними об'єктами. Завдяки своїм характеристикам вони не лише компенсують коливання навантаження, а й беруть участь у вирівнюванні провальних ділянок графіка електроспоживання, що дозволяє оптимізувати роботу базових станцій, зокрема АЕС і КЕС. Агрегати ГЕС та ГАЕС ПрАТ «Укргідроенерго» здатні змінювати свою потужність у межах від кількох десятків секунд до декількох хвилин, що робить їх надзвичайно ефективними в контексті балансування потужності в реальному часі.

Особливо важливою є роль ГАЕС у разі аварійних ситуацій, коли значна кількість генеруючих потужностей вибуває з системи. У такому

випадку можливе екстрене увімкнення ГАЕС у турбінному режимі або миттєве перемикання з насосного режиму в турбінний, що дозволяє швидко компенсувати дефіцит потужності й уникнути аварійного відключення споживачів. Отже, гідроакумулювальні станції є ключовим інструментом для підвищення надійності, гнучкості та стабільності функціонування об'єднаної енергосистеми.

1.2 ВДЕ як частина ОЕС

Відновлювані джерела енергії (ВДЕ) становлять собою тип енергоресурсів, що поновлюються природним шляхом у масштабах людської цивілізації. Відповідно, енергетика, що ґрунтується на отриманні та використанні енергії з таких джерел, класифікується як відновлювана. До категорії ВДЕ належать сонячна енергія, енергія вітру, гідроенергія, біомаса органічного походження та інші види енергії, джерелом яких є природні цикли.

Усі ВДЕ належать до класу розподіленого генерування (РГ), що передбачає децентралізоване виробництво енергії. Такий підхід передбачає наявність численних споживачів, які одночасно є і виробниками енергії для власного споживання, з можливістю передавання надлишкової електроенергії до загальної мережі. Установки РГ можуть мати потужність від кількох кіловат до десятків мегават і представлені широким спектром технологій — від дахових сонячних панелей і малих вітроелектростанцій до їхніх комбінацій. Згідно із Законом України «Про ринок електричної енергії», розподілена генерація визначається як електростанція встановленою потужністю не більше 20 МВт, яка приєднана до системи розподілу електричної енергії.

Серед ключових факторів, що стимулюють розвиток РГ, варто відзначити: підвищення надійності електропостачання, розвиток

когенераційних технологій (одночасне виробництво електроенергії та тепла), можливість покриття навантажень у пікові години, забезпечення енергією об'єктів з високими вимогами до якості постачання, відтермінування значних інвестицій у модернізацію транспортної та розподільної інфраструктури, а також надання допоміжних послуг в енергосистемі. Усе це сприяє зменшенню втрат при передачі та розподілі електроенергії, а також забезпечує вищий рівень енергетичної незалежності.

До загальних переваг ВДЕ для споживачів і постачальників електроенергії належать:

- екологічна чистота процесу виробництва електроенергії;
- зниження економічних втрат, пов'язаних із перебоями в електропостачанні;
- відтермінування витрат на оновлення чи розширення інфраструктури електричних мереж.

Загальнонаціональна стратегічна цінність розвитку відновлювальної енергетики полягає в її здатності зменшувати енергетичну залежність держави, зокрема України. Це, у свою чергу, зміцнює економічну стабільність, підвищує рівень екологічної безпеки, сприяє зростанню енергетичної диверсифікації, а отже, і формуванню енергетичної безпеки держави.

Енергетична безпека розглядається в межах двох ключових аспектів:

- диверсифікація джерел постачання енергоносіїв, що передбачає географічне розширення каналів імпорту енергії та збільшення кількості постачальників;

– диверсифікація споживаних енергоресурсів, тобто зміна структури енергетичного балансу за рахунок збільшення частки внутрішніх поновлюваних джерел.

У глобальному контексті відновлювана енергетика є провідним напрямком розвитку, і більшість країн світу прагнуть до її широкого впровадження, насамперед завдяки її екологічності, стратегічній незалежності та наявності невичерпної ресурсної бази.



Рисунок 1.2 Напрями енергетичної диверсифікації

З огляду на стрімке прискорення глобальних процесів електрифікації, прогнозується подальше зростання попиту на електричну енергію. Це явище особливо характерне для постіндустріальних країн, у структурі економіки яких домінує сектор послуг. Саме в таких економіках спостерігається підвищене споживання електроенергії, зумовлене високим рівнем

автоматизації, цифровізації та широким використанням електроінтенсивних технологій.

На рисунку 1.3 представлено графічну інтерпретацію залежності встановленої потужності від рівня енергетичного розвитку у глобальному вимірі впродовж наступних десятиліть. Ці дані ілюструють очікувану динаміку зростання встановлених генеруючих потужностей відповідно до соціально-економічного поступу країн світу.

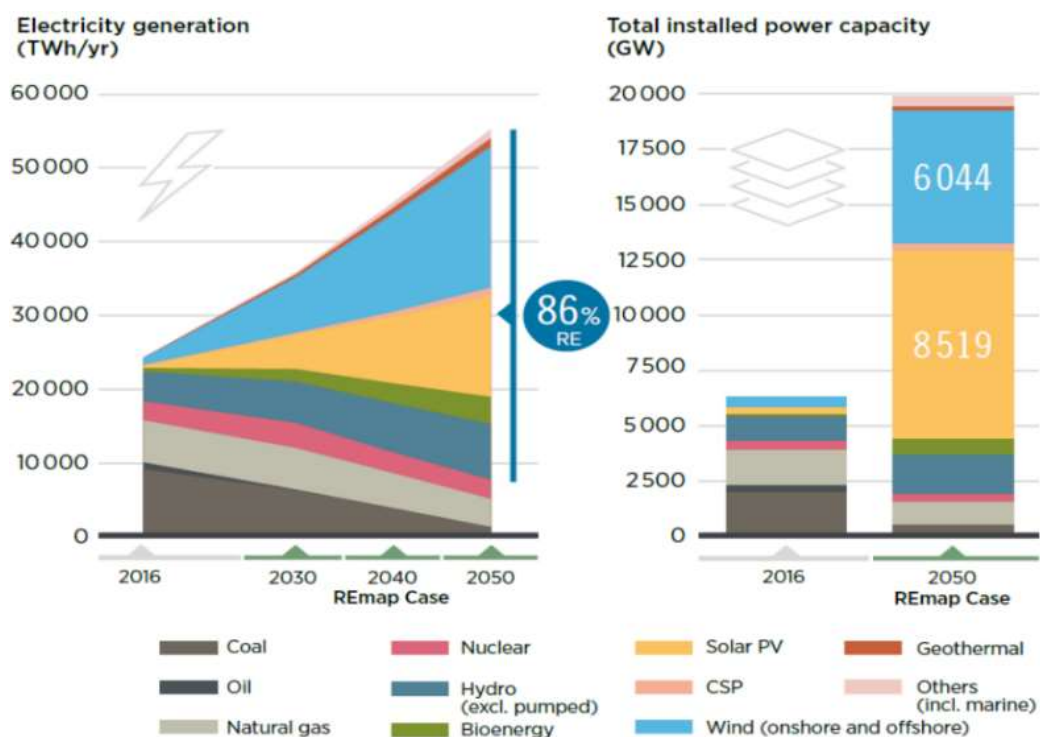


Рисунок 1.3 Частка відновлюваної енергії у генерації та встановленій потужності

Згідно з прогнозом, оприлюдненим Міжнародним агентством з відновлюваних джерел енергії (IRENA), до 2050 року очікується, що річна генерація електроенергії у світі досягне приблизно 55 000 ТВт·год, з яких 86 % становитиме відновлювана енергетика. Загальний обсяг встановленої потужності, відповідно до прогнозу, перевищить 20 000 ГВт, при цьому на

фотоелектричну генерацію (ФВ) припадатиме 8 510 ГВт, а на вітроенергетику (ВЕС) — 6 044 ГВт, що разом становить близько 72,8 % усієї встановленої потужності. Таким чином, фотоелектричні установки визначаються як головне джерело енергії у найближчому майбутньому.

Україна, завдяки наявності значного потенціалу у сфері ВДЕ, а також дієвим інструментам стимулювання, зокрема механізму «зеленого» тарифу, демонструє динамічне зростання у сфері відновлюваної енергетики. Зокрема, частка ВДЕ у структурі виробництва електроенергії в Україні зросла з 1,8 % у 2018 році до 10 % у 2021 році за часткою у загальній встановленій потужності Об'єднаної енергетичної системи (ОЕС) України. У подальшому частка ВДЕ продовжила зростати, досягнувши 16 % у 2021 році.

Візуалізація структури встановленої потужності об'єктів генерації наведена на рисунку 1.4.

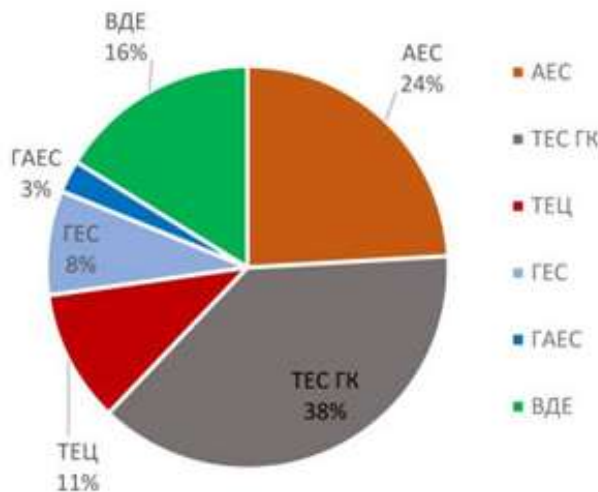


Рисунок 1.4 Встановлена потужність ОЕС України

Повномасштабна військова агресія Російської Федерації проти України справила суттєвий негативний вплив на розвиток відновлюваної енергетики держави. Унаслідок активних бойових дій та тимчасової

окупації окремих територій було втрачено до 80 % потужностей вітроелектростанцій (ВЕС) та понад 20 % сонячних електростанцій (СЕС).

На початку 2022 року загальна встановлена потужність об'єктів відновлюваної генерації, приєднаних до енергетичної системи України, досягла 9,5 ГВт (без врахування 0,6 ГВт, розміщених на територіях, що перебували під тимчасовою окупацією РФ до 24 лютого 2022 року). У період з 2009 по 2021 рік в український сектор відновлюваної енергетики було інвестовано приблизно 12 млрд доларів США, що свідчить про його активний розвиток та інвестиційну привабливість.

Станом на теперішній час, 2,5 ГВт потужностей ВДЕ, що становить 25 % загального обсягу, залишаються на тимчасово окупованих територіях. Окрім того, пошкоджено або повністю знищено близько 6 % сукупної встановленої потужності ВДЕ в країні.

Серед усіх джерел ВДЕ основну частку займають сонячні електростанції. Так, на початок 2022 року встановлена потужність СЕС (без урахування 0,4 ГВт на окупованих територіях) сягнула 7,6 ГВт, що становить близько 80 % від усіх об'єктів ВДЕ в Україні. Сюди також входять понад 45 000 установок побутових споживачів-генераторів (просюмерів) із сумарною потужністю 1,2 ГВт.

На сьогодні приблизно 13 % фотоелектричних потужностей України залишаються на окупованих територіях. Близько 8 % встановленої сонячної генерації знищено або серйозно пошкоджено. Після звільнення частини окупованих територій об'єкти ВДЕ поступово вводяться в експлуатацію, однак, за результатами попередніх обстежень, до 20 % сонячних панелей зазнали фізичних ушкоджень.

Оператори системи розподілу (ОСР) зіткнулися з додатковими викликами, пов'язаними із прийманням надлишків виробленої електроенергії з відновлених об'єктів, що спричинено значними пошкодженнями розподільчих мереж в окремих регіонах.

Ілюстрація втрат і розподілу пошкоджень СЕС представлена на рисунку 1.5.

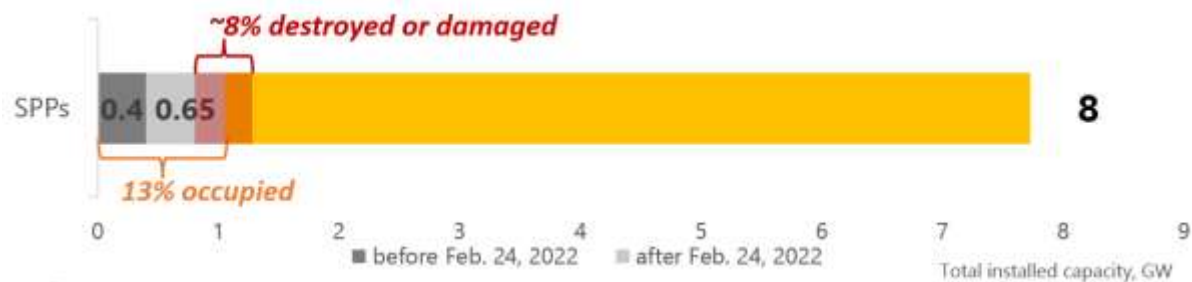


Рисунок 1.5 Розподіл встановленої потужності СЕС внаслідок вторгнення РФ в Україну

На початок 2022 року загальна встановлена потужність ВЕС України (всі наземні) становила 1,6 ГВт.

Майже всі вітроелектростанції України побудовані в південних регіонах на узбережжі Азовського та Чорного морів (Херсонська та Запорізька області). Зараз південь України перебуває в окупації, саме там є найбільший вітровий потенціал. Таким чином, приблизно 80% потужностей вітрової генерації (рисунок 1.6) розташовано на окупованих територіях.



Рисунок 1.6 Розподіл встановленої потужності ВЕС внаслідок вторгнення РФ в Україну

Незважаючи на виклики, пов'язані з повномасштабною війною, упродовж 2022–2023 років в Україні було введено в експлуатацію понад 660

МВт нових потужностей об'єктів відновлюваної генерації. До таких об'єктів належать сонячні та вітрові електростанції, біогазові установки, а також малі гідроелектростанції, що забезпечують різноманітність структури ВДЕ.

У межах формування довгострокової стратегії розвитку галузі був запропонований Національний план дій з розвитку відновлюваної енергетики до 2030 року, яким передбачено досягнення 8 ГВт встановленої потужності з ВДЕ, що становитиме 12,6 % від загального енергетичного балансу країни. При цьому прогнозований обсяг річного виробництва електроенергії складе 14 ТВт·год, або 28 ТВт·год з урахуванням великих гідроелектростанцій.

Розрахунок оптимального рівня встановленої потужності ВДЕ до 2030 року здійснювався з урахуванням технічних можливостей Об'єднаної енергетичної системи України, зокрема пропускної спроможності мереж, обсягів регулюючих і маневрових потужностей, а також нормованої вартості виробництва електроенергії з ВДЕ джерел [4] .

За різними оцінками, технічно можливий потенціал розвитку вітроенергетики в Україні становить 10–15 ГВт, водночас цільовий рівень до 2030 року орієнтовано на 3–4 ГВт. Проте відсутність можливості забезпечити державну підтримку на рівні аналогічному до країн ЄС потребує впровадження нових, більш ефективних ринкових механізмів стимулювання інвестицій.

У частині сонячної генерації, економічно доцільний потенціал в Україні оцінюється на рівні 4 ГВт. З урахуванням того, що щороку територія України отримує близько 1,2 МВт·год/м² сонячного випромінювання, навіть 1 % цієї енергії, технічно освоєний без значних капіталовкладень, відкриває значний потенціал для розвитку СЕС. Цільовий обсяг встановленої потужності сонячної генерації до 2030 року оцінюється як такий, що здатен зростати сталими темпами, насамперед завдяки зниженню капітальних витрат на будівництво станцій, що зумовлено технологічним прогресом і

досвідом реалізації аналогічних проєктів у країнах із подібним кліматичним потенціалом.

Процес генерації електроенергії на СЕС ґрунтується на перетворенні енергії фотонів, що потрапляють на фотоелементи, в постійний струм шляхом реалізації явища фотоефекту [5]. Далі постійний струм за допомогою інверторів трансформується у змінний струм, який або подається в енергомережу для реалізації за «зеленим» тарифом, або накопичується в акумуляторних батареях — залежно від архітектури станції.

Принцип дії вітрових електростанцій передбачає перетворення кінетичної енергії вітрових потоків у механічну енергію обертання турбіни, яка за допомогою генератора трансформується у електричну. Потужність, що генерується, прямо пропорційна швидкості вітру.

Більшу частину електроенергії, що виробляється з відновлюваних джерел, забезпечують саме СЕС та ВЕС, що відображено на рисунку 1.7.



Рисунок 1.7 Розподіл встановленої потужності ВДЕ в Україні

1.3 Вплив ВДЕ на баланс електроенергії в ОЕС

В ОЕС України існує дефіцит маневрових генеруючих потужностей, що працюють в діапазоні генерування потужностей і регулюють частоту енергосистеми, на відміну від «базових» блоків АЕС, що працюють на одному рівні, і втручання у виробіток електроенергії яких економічно недоцільно, та що найважливіше — технологічно складно і небезпечно. Загалом рівень маневреної генерації не перевищує 9 %.

В той же час протягом останніх років було введено в ОЕС нових генеруючих потужностей вдвічі більше ніж за попередній період. Цьому сприяли державні економічні стимули для будівництва домашніх і промислових ВЕС і СЕС. В нашій державі стимули для розвитку ВДЕ — є одними із найбільш привабливих у світі, що забезпечило їхнє потужне будівництво і проектування.

Електрична енергія, що генерується джерелами електроенергії СЕС та ВЕС, носить імовірнісний характер. Впродовж доби та протягом року потужність таких типів електростанцій може змінюватись від максимального до мінімального значення не один раз (рисунок 1.8).

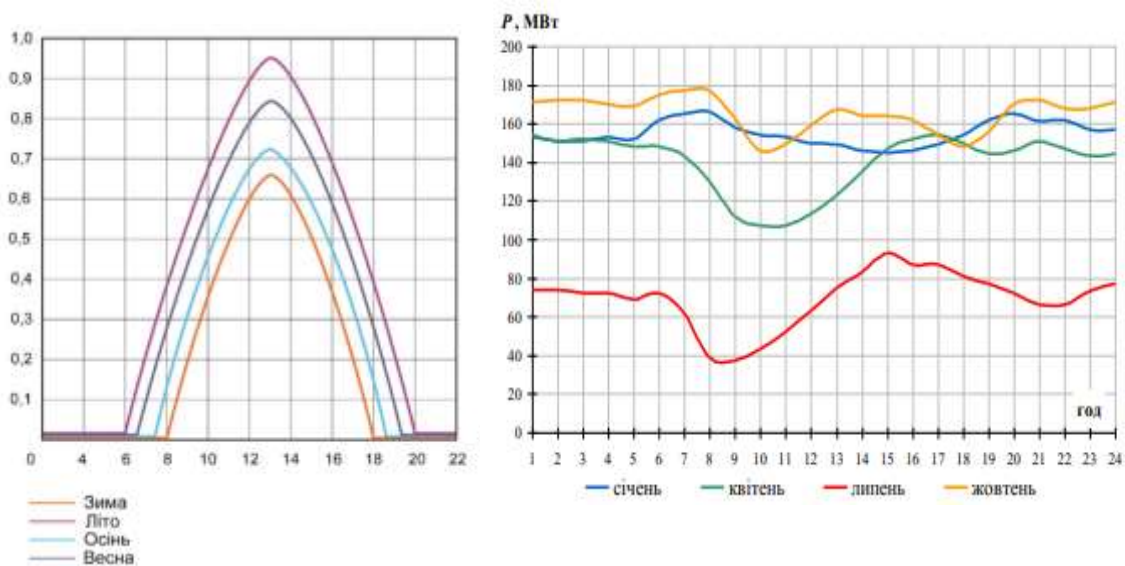


Рисунок 1.8 Усереднений річний графік видачі потужності СЕС

Змінний та непередбачуваний характер видачі потужності, що притаманний сонячній та вітровій енергетиці, може призводити до негативного впливу на режими роботи Об'єднаної енергетичної системи України. Цей вплив стосується стійкості динамічних процесів у системах енергопостачання, а також ускладнює організацію диспетчерського керування енергосистемами.

Нестабільне виробництво електроенергії, спричинене несприятливими погодними умовами, здатне призводити до похибок у прогнозуванні обсягів виробництва електроенергії з відновлюваних джерел. Унаслідок цього виникає розбіжність між запланованим обсягом відпуску електроенергії та фактичним її виробленням. Таким чином, впровадження додаткових генеруючих потужностей, які важко піддаються точному прогнозуванню, спричиняє небаланси потужності, що впливають на коливання частоти в енергосистемі (рисунок 1.9).



Рисунок 1.9 Небаланс в ОЕС внаслідок безконтрольного інтегрування потужностей ВДЕ

Важливою умовою інтеграції нових потужностей відновлюваних джерел енергії (ВДЕ) в Об'єднану енергетичну систему (ОЕС) України є забезпечення дотримання вимог до їх правильної генерації, що передбачає підтримання постійного балансу між виробленням та споживанням електричної енергії. При цьому необхідно забезпечувати належні параметри якості електроенергії, а також відповідний рівень резервних потужностей [6].

Недостатня точність прогнозування вироблення електроенергії з ВДЕ спричиняє виникнення небалансів в енергосистемі. У таких випадках забезпечення балансу між попитом і пропозицією енергії досягається шляхом примусового обмеження генерації, що реалізується через тимчасове відключення сонячних або вітрових електростанцій від мережі.

З огляду на потенційно негативний вплив ВДЕ на параметри роботи ОЕС, зокрема зниження частоти та зменшення обсягів фінансових надходжень виробникам електроенергії, виникає потреба у системному балансуванні їхньої генерації. Під балансуванням у цьому контексті слід розуміти технічну компенсацію нестабільності генерації з ВДЕ.

Ефективне балансування можливо реалізувати за рахунок використання маневрових потужностей, зокрема газотурбінних установок (ГТУ), гідроакумулювальних електростанцій (ГАЕС), поршневих установок, які традиційно використовуються для покриття пікових навантажень. Крім того, важливу роль у балансуванні відіграють системи накопичення енергії, а також впровадження сучасних методів прогнозування генерації електроенергії, що дозволяє зменшити похибки та, відповідно, рівень небалансів.

Прогнозування електричного навантаження, обсягів генерації та споживання є базовим інструментом планування нормальних режимів роботи енергосистеми. Формування прогнозу генерації електроенергії з ВДЕ, зокрема сонячних електростанцій (СЕС), потребує врахування комплексу чинників. До основних із них належать:

- географічне розташування станції, кут нахилу та рівень запиленості фотомодулів;
- метеорологічні параметри, зокрема температура навколишнього середовища, яка впливає на нагрів елементів фотоелектричних модулів і, відповідно, знижує ефективність фотоефекту;
- рівень сонячної інсоляції, що визначається ступенем хмарності і прямо впливає на кількість доступної сонячної радіації.

Аналітичні дослідження засвідчують, що до 95% усіх відхилень між прогнозованими та фактичними обсягами вироблення електроенергії зумовлені похибками у прогнозуванні метеорологічних параметрів.

Відтак значні похибки у процесі прогнозування генерації з ВДЕ призводять до істотних небалансів в енергосистемі.

1.4 Системи зберігання електроенергії

Стрімкий розвиток відновлюваних джерел енергії, які характеризуються нестабільною генерацією, стимулював масштабну модернізацію інфраструктури енергосистем. Одним з ключових напрямів цієї модернізації є впровадження регулюючих та резервних засобів підтримки електропостачання, здатних забезпечити регулювання частоти, підтримку необхідного рівня напруги, а також покриття пікових навантажень. Системи зберігання енергії виконують функцію акумулювання надлишкової електроенергії на різних рівнях енергетичної системи, здійснюючи оперативне регулювання її режимів та згладжуючи коливання потужності. У процесі експлуатації такі системи накопичують енергію, коли отримують її від джерел ВДЕ або від електричної мережі, і віддають накопичену електроенергію назад у мережу в періоди зростання навантаження або дефіциту генеруючих потужностей [7].

У світовій енергетиці системи зберігання енергії відіграють усе більш важливу роль. Станом на сьогодні їхня сукупна встановлена потужність сягнула приблизно 170 ГВт. Найбільші обсяги потужностей зосереджено в

Китайській Народній Республіці (19 % від світових), Японії (17 %), Сполучених Штатах Америки (14 %), а також у країнах Європейського Союзу — зокрема в Іспанії, Італії та Німеччині. Згідно з прогнозами, до 2030 року загальна потужність енергетичних накопичувачів може зрости втричі.

У найближчому майбутньому системи зберігання електроенергії можуть набути статусу повноправних об'єктів енергосистеми, подібно до генераційних, передавальних і розподільчих об'єктів. Вони братимуть участь у ринку електричної енергії, впливатимуть на ціну електроенергії та забезпечуватимуть стабільність параметрів її якості.

При взаємодії з ВДЕ системи зберігання електроенергії функціонують у режимі постійного циклу зарядки та розрядки, згладжуючи добові коливання та компенсуючи енергетичні небаланси, що виникають у процесі експлуатації відновлюваних джерел. Таким чином, вони забезпечують стабільне та безперервне постачання електроенергії до споживачів.

В умовах взаємодії з енергосистемою, зокрема в нічний час або у періоди відключення споживачів, накопичувачі забезпечують резервне електропостачання. Для ефективного функціонування в складі комплексних енергосистем системи зберігання електроенергії повинні відповідати таким основним вимогам:

- забезпечення стабільної видачі електроенергії незалежно від періодичності роботи джерел ВДЕ, а також у разі порушення зв'язку з централізованою мережею;
- підтримання необхідного рівня напруги та автоматичне регулювання режимів роботи;
- відповідність рівня енергоемності потребам енергосистеми, з використанням модульної структури на основі послідовного або паралельного з'єднання акумуляторних елементів.

Системи зберігання електроенергії можуть бути як централізованими, так і децентралізованими, із відповідним урахуванням специфіки архітектури енергосистеми.

Згідно з класифікацією, що надається Європейською асоціацією з питань накопичення енергії (EASE), існує кілька основних типів систем зберігання енергії, серед яких:

- механічні системи (включаючи гідроакumuлюючі електростанції та маховики),
- теплові (накопичення енергії у вигляді тепла з подальшим перетворенням),
- хімічні (на основі перетворення електроенергії у водень чи синтетичні гази),
- електрохімічні (літій-іонні, свинцево-кислотні акумулятори тощо),
- електричні (суперконденсатори, надпровідні накопичувачі).

На рисунку 1.10 подано ілюстративну класифікацію сучасних систем накопичення енергії відповідно до їх технологічного принципу.

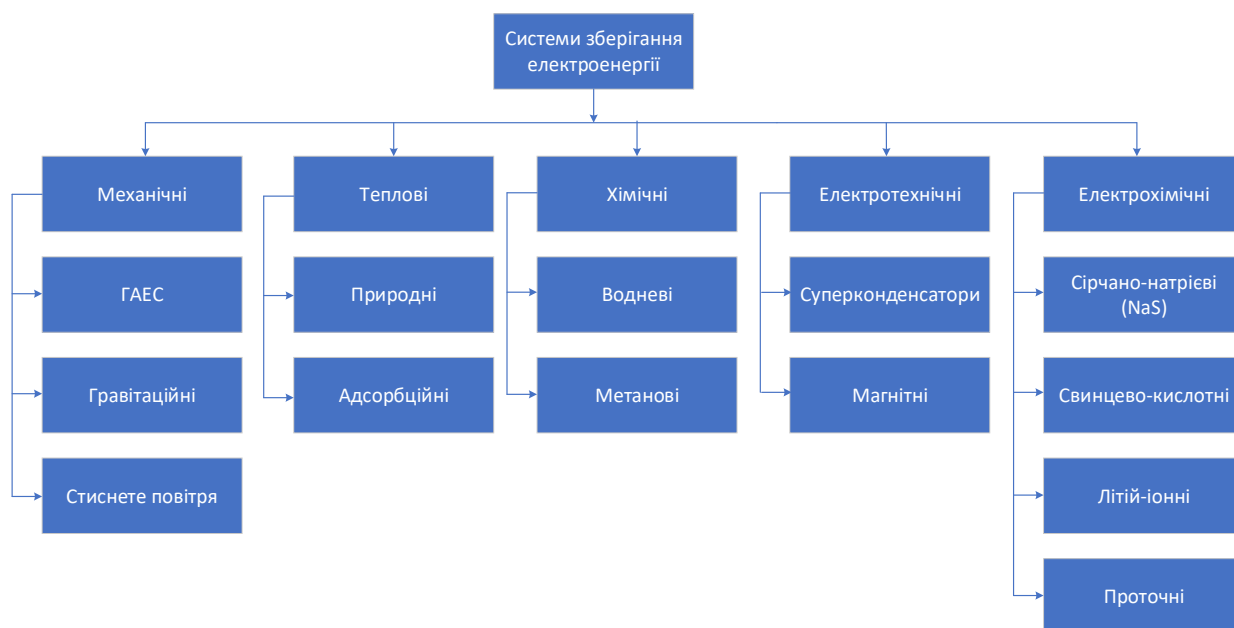


Рисунок 1.10 Класифікація систем зберігання енергії

На сьогодні найбільш поширеним способом зберігання енергії є ГАЕС, на які припадає найбільша частина світового зберігання енергії. Завдяки своїм властивостям ГАЕС як основна складова маневрових потужностей,

забезпечують енергосистеми необхідною кількістю гігаватів коли це необхідно, загальна структура ГАЕС зображена на рисунку 1.11.



Рисунок 1.11 ГАЕС в розрізі

Проте впровадження таких систем пов'язане з істотними капітальними витратами, що обумовлено складністю будівельних робіт, необхідністю наявності сприятливого природного рельєфу з великим перепадом висот, а також потребою у затопленні значних площ території. Використання гідроакumuлювальних електростанцій (ГАЕС) є доцільним переважно у випадках, коли необхідне регулювання роботи не окремих електростанцій на базі традиційних чи відновлюваних джерел енергії, а функціонування великих енергетичних об'єднань.

Окрему категорію складають накопичувачі енергії, принцип дії яких ґрунтується на використанні гравітаційної сили та сили тертя. Такі пристрої, що мають назву гравітаційних накопичувачів, працюють за аналогією до

ГАЕС: вони генерують електричну енергію шляхом спуску вантажів з певної висоти в момент потреби у потужності.

Цікавим прикладом реалізації гравітаційного принципу є проект, створений американською компанією **Advanced Rail Energy Storage North America** (рисунок 1.12). У даній системі замість традиційного переміщення води між резервуарами використано залізничну колію протяжністю близько 8 км, якою переміщуються вагони з баластом. У режимі накопичення енергії вагони піднімаються до вершини пагорба, а в режимі віддачі енергії — спускаються вниз, приводячи в дію генератори.

Висотна різниця між крайніми точками траси становить 900 м, що перевищує аналогічний показник більшості існуючих ГАЕС. При повному навантаженні система забезпечує відпуск до 50 МВт потужності, тобто близько 1,5 МВт з кожного із 32 вагонів.



Рисунок 1.12 Гравітаційний накопичувач електроенергії вагонеткового виконання

За аналогічним гравітаційним принципом функціонує ще один інноваційний проєкт — система зберігання енергії у вигляді башти (рисунок 1.13). У періоди надлишкового виробництва електроенергії, наприклад, в

денні години при активній генерації сонячними електростанціями або за умов інтенсивного вітру, в роботу включається електродвигун, який за допомогою автоматизованої системи керування активує кран. Останній піднімає бетонні блоки та укладає їх один на одний, формуючи навколо себе вертикальну конструкцію — своєрідну енергетичну башту.

У разі виникнення дефіциту електроенергії в енергомережі, башта починає розбиратися: бетонні блоки по черзі опускаються вниз, при цьому вивільняється потенційна енергія, яка за рахунок гравітаційної сили перетворюється на електричну. Таким чином, система виконує функцію гравітаційного акумулятора, здатного оперативно реагувати на коливання попиту та пропозиції в енергосистемі.

Відповідно до конструктивних характеристик, у подібній башті можливо накопичити до 20 МВт·год енергії. Такий підхід до зберігання електроенергії вирізняється високою екологічністю, тривалим терміном служби та незалежністю від географічного розташування і складних інфраструктурних вимог, які є притаманними традиційним гідроакумулювальним електростанціям.



Рисунок 1.13 Гравітаційний накопичувач електроенергії баштового виконання

В якості накопичувача енергії може бути стиснене повітря, що утримується у ємності великого об'єму [9]. (рисунок 1.14).



Рисунок 1.14 Резервуар для зберігання стисненого повітря

Для систем зберігання енергії, заснованих на використанні стисненого повітря (CAES — Compressed Air Energy Storage), зазвичай використовуються природні або штучно створені підземні резервуари. Найчастіше такими резервуарами є печери у скельних породах, соляні печери, водоносні горизонти, пористі геологічні формації, а також виснажені нафтові та газові родовища. В окремих випадках застосовується інфраструктура офшорних вітрових електростанцій (ВЕС), де можливе нагнітання повітря в підводні резервуари, розташовані на дні моря. Такий підхід є технічно доцільним завдяки наявності сприятливої глибини у безпосередній близькості до вітрових турбін, що дозволяє ефективно інтегрувати систему накопичення повітря в загальну інфраструктуру офшорної генерації. Концепція була підтверджена на практиці в рамках експериментальних проєктів із застосуванням спеціально сконструйованих підводних резервуарів.

Ще одним перспективним напрямом розвитку систем зберігання енергії є акумулювання теплової енергії з подальшим її перетворенням в електричну. Такий підхід особливо ефективний у комбінації із сонячними енергетичними установками, де природна добова нерівномірність інсоляції ускладнює стабільне вироблення електроенергії. Теплові накопичувачі дозволяють зберігати енергію у вигляді тепла в періоди активного сонячного випромінювання, а потім використовувати накопичене тепло для генерації електроенергії в періоди низької сонячної активності або в нічний час.

Яскравим прикладом інноваційного використання подібної технології є проєкт «Future Energy System – FES» компанії Siemens Gamesa (рисунок 1.15). У межах цього проєкту здійснюється зберігання надлишкової електроенергії у вигляді тепла шляхом нагрівання пористого матеріалу (гранітного щебеню) до високих температур. Збережена енергія у формі тепла зберігається у спеціальних ізольованих резервуарах, а за необхідності — перетворюється назад в електричну за допомогою парових турбін, що живляться генерованою тепловою енергією. Такий підхід забезпечує високу ефективність, екологічну безпеку та тривалу експлуатаційну стабільність.



Рисунок 1.15 Система зберігання електричної та теплової енергії

У рамках проєкту FES тепла енергія накопичується в масиві з гірської породи, яка виконує роль теплового акумулятора. Вказана порода захищена від теплових втрат завдяки поєднанню кам'яного насипу та термоізоляційного шару. Надлишкова електрична енергія, що надходить, переважно, з вітрових електростанцій, перетворюється на теплову за допомогою резистивного нагріву і передається гірській породі, де накопичується в обсязі до 30 МВт·год. У міру потреби збережене тепло використовується для генерації пари, яка приводить в дію турбіну, що перетворює теплову енергію назад в електричну та подає її до енергосистеми.

Ще однією ефективною технологією теплового зберігання енергії є адсорбційні системи. Їх принцип роботи базується на явищах сорбції — абсорбції (поглинання одного матеріалу іншим) і адсорбції (накопичення рідини або газу на поверхні твердого тіла). Ці процеси супроводжуються виділенням або поглинанням тепла, що дає змогу застосовувати їх для акумулювання теплової енергії.

У типових адсорбційних накопичувачах використовується пара матеріалів — адсорбент (твердий, наприклад цеоліт) та адсорбат (наприклад водяна пара). Під час зарядки системи відбувається десорбція — адсорбат випаровується і зберігається окремо. При розрядці — матеріали контактують знову, і при їх взаємодії відбувається виділення тепла. Унікальною властивістю таких систем є практично повна відсутність теплових втрат під час зберігання — після зарядки резервуар може охолонути до температури навколишнього середовища, але при цьому енергія зберігається в хімічній формі доти, доки не буде повторно ініційовано контакт між компонентами.

Конструктивно адсорбційні системи складаються з адсорбера, резервуара з вбудованим і зовнішнім теплообмінниками, випарника та конденсатора. Ці установки можуть працювати в системах опалення, кондиціонування та охолодження як в мобільному, так і в стаціонарному

виконанні, в діапазоні до кількох мегават-годин. Це дозволяє їм бути дієвим інструментом у гнучкому управлінні енергетичним попитом.

Ще один напрям розвитку систем зберігання — хімічні накопичувачі електроенергії. Їхня дія базується на перетворенні електроенергії в хімічну енергію шляхом синтезу енергоємних речовин. Згодом ці речовини використовуються для зворотного виробництва електричної енергії. Найперспективнішим серед них є водень (H_2), який завдяки високій енергоємності, універсальності застосування, екологічній чистоті та транспортуваності став об'єктом багатьох наукових і промислових розробок.

Водень може отримуватись шляхом електролізу води в періоди низького навантаження, спрямовується на розщеплення води на водень і кисень. Сформований водень зберігається у спеціальних балонах або резервуарах під високим тиском для подальшого використання в паливних елементах або газотурбінних установках (рисунок 1.16). Таким чином, хімічне зберігання енергії забезпечує тривале і масштабоване резервування, що може бути використано як для стабілізації електромережі, так і для транспортної сфери та теплогенерації.



Рисунок 1.16 Процес накопичення водневої енергії

У періоди пікових навантажень або дефіциту електроенергії в системі, накопичена енергія, що зберігається у вигляді водню, може бути ефективно перетворена назад у електричну або теплову енергію за допомогою паливних елементів чи спеціалізованих турбін. Паливні елементи здійснюють пряме електрохімічне перетворення хімічної енергії водню в електричну, при цьому процес не супроводжується шкідливими викидами або шумовими ефектами, що є їх значною перевагою порівняно з традиційними способами генерації.

Ключовий елемент паливного елементу — електроліт, який проводить позитивно заряджені частинки (протони). Водень, поданий до анода, розщеплюється на протони і електрони. Протони проходять через електроліт до катода, тоді як електрони проходять через зовнішнє електричне коло, створюючи електричний струм. На катоді водень знову з'єднується з киснем з повітря, утворюючи воду та тепло. Такий процес забезпечує безперервну генерацію електроенергії доти, доки подається паливо, і є придатним як для стаціонарних енергетичних установок, так і для транспортних засобів і мікромереж.

Інший перспективний напрям використання хімічних накопичувачів енергії — це технологія синтезу метану з водню та вуглекислого газу. Цей процес, відомий як метанування, здійснюється в каталітичному реакторі, де водень (H_2), отриманий внаслідок електролізу, реагує з CO_2 з утворенням метану (CH_4) — основного компонента природного газу. Таким чином, надлишкова електроенергія з відновлюваних джерел може бути ефективно акумульована в хімічно стабільній формі синтетичного метану, який зручно транспортувати і зберігати.

Система зберігання у вигляді синтетичного метану має ряд переваг: можливість довготривалого зберігання, сумісність з існуючою інфраструктурою транспортування і розподілу природного газу, гнучке використання для виробництва електроенергії, тепла чи як паливо. Прикладом практичної реалізації цієї концепції є станції, що працюють на

стисненому природному газі — CNG-станції (Compressed Natural Gas), які демонструють можливість прямої інтеграції таких систем у сучасні енергетичні мережі (рисунок 1.17).

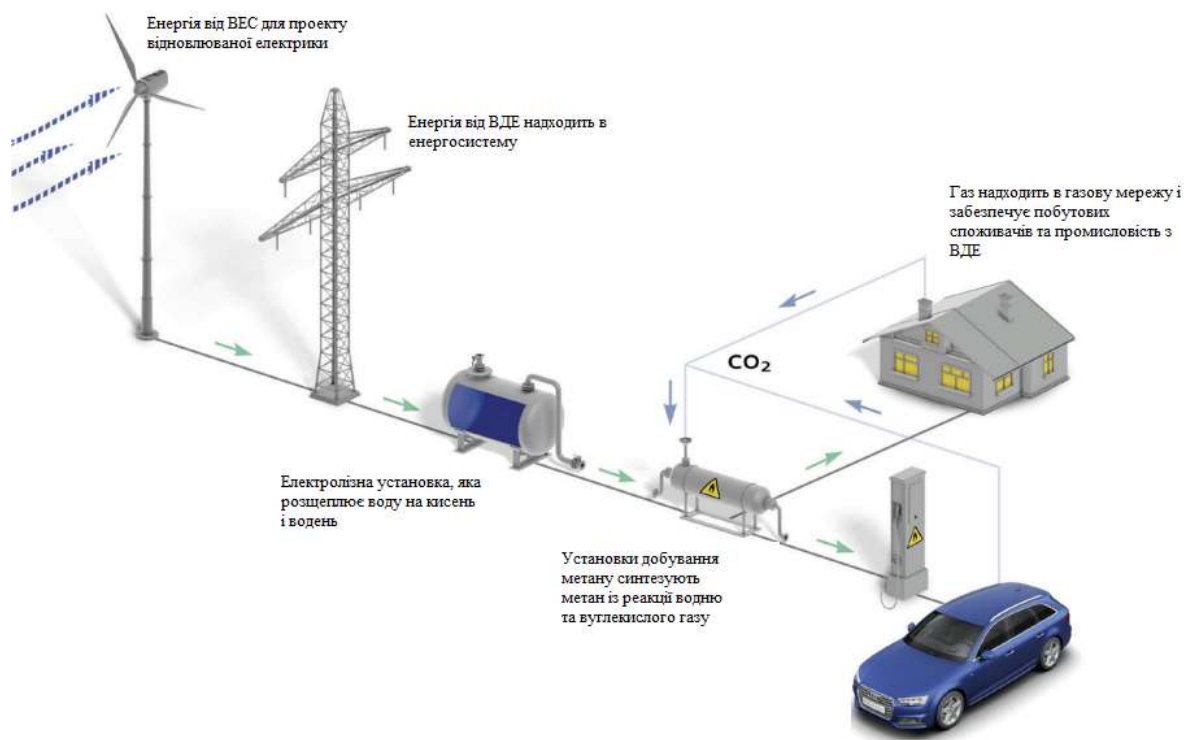


Рисунок 1.17 Застосування CNG - станції

До електротехнічних накопичувачів енергії особливе місце займають суперконденсатори (також відомі як ультраконденсатори або електрохімічні конденсатори), які поєднують властивості традиційних конденсаторів та акумуляторів. Вони здатні зберігати значно більший обсяг електричної енергії порівняно зі звичайними конденсаторами завдяки використанню подвійного електричного шару на межі електрод-електроліт. Їхня ємність може бути у тисячі разів більшою, що забезпечує набагато вищу щільність енергії.

Суперконденсатори є імпульсними електрохімічними пристроями, призначеними для швидкої зарядки та розрядки. Завдяки своїй здатності компенсувати миттєві зміни навантаження, вони широко використовуються

в системах, де виникають короточасні стрибки або падіння напруги, а також в автономних енергетичних установках для стабілізації напруги.

Основною перевагою суперконденсаторів є їхня здатність миттєво реагувати на зміни потужності, що особливо цінно в енергетичних системах з високою динамікою навантаження. Вони можуть працювати в режимі буферного накопичення енергії, забезпечуючи живлення впродовж дуже короткого часу, наприклад, під час запуску обладнання або перемикачів у мережі.

Завдяки високій циклічності заряд/розряд, надзвичайно великому терміну служби (до мільйона циклів), високій ефективності (понад 95%) та мінімальному тепловиділенню, суперконденсатори є перспективним елементом у складі систем енергонакопичення нового покоління. Зображення типового виконання суперконденсатора представлено на рисунку 1.18.

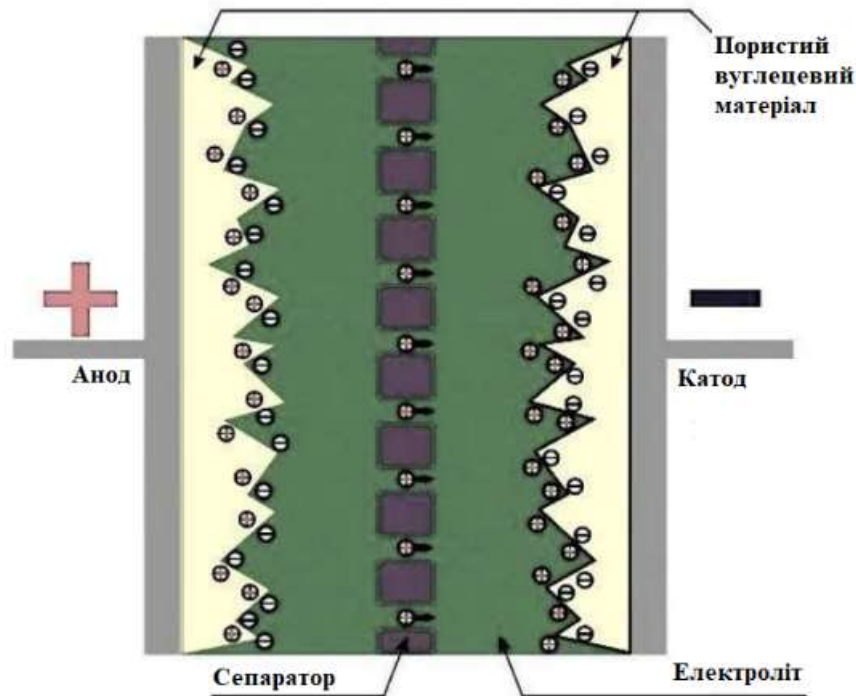


Рисунок 1.18 Принцип дії суперконденсатора

Зарядження суперконденсаторів відбувається завдяки накопиченню електричного заряду на межі поділу фаз між електродом та електролітом, створюючи подвійний електричний шар. На відміну від акумуляторів, у суперконденсаторах не відбувається хімічних реакцій, що забезпечує їхню високу швидкодію, тривалий термін служби (до мільйона циклів) та високу ефективність процесу накопичення і повернення енергії. Враховуючи ці особливості, суперконденсатори доцільно інтегрувати в гібридні енергосистеми разом з акумуляторними батареями, зокрема в системах накопичення енергії для відновлюваних джерел, де вони ефективно компенсують короточасні піки навантаження та стабілізують коливання напруги.

До електротехнічних накопичувачів також належать надпровідникові магнітні накопичувачі енергії (SMES – Superconducting Magnetic Energy Storage), які акумулюють енергію у вигляді магнітного поля. Це поле створюється постійним електричним струмом, що протікає через котушку, виготовлену з надпровідного матеріалу. Завдяки надпровідності, опір котушки дорівнює нулю, що забезпечує мінімальні втрати енергії під час зберігання, а також миттєву віддачу накопиченої енергії при розряді. Основною перевагою SMES є надзвичайно короткий час реакції — енергія передається в мережу практично миттєво після запиту. Такі системи ефективно використовуються в енергосистемах для підтримання стабільності, особливо в режимах з різкими навантаженнями або в умовах підвищеної чутливості до коливань напруги.

Найбільше поширення серед систем зберігання енергії мають електрохімічні накопичувачі – акумулятори. Їх принцип дії ґрунтується на оборотних хімічних реакціях, які відбуваються в розчині електроліту, що міститься в герметичному корпусі. У середовищі електроліту занурено два електроди – анод і катод. Під час зарядження хімічна енергія перетворюється в електричну і накопичується у вигляді зміненого хімічного стану речовин на електродах. При розряджанні відбувається зворотний

процес — хімічна енергія знову перетворюється в електричну, яка надходить до споживача. Конструкція, тип електроліту та хімічний склад електродів визначають ключові параметри акумуляторів: енергетичну щільність, кількість циклів заряд-розряд, ефективність, температуру експлуатації та екологічні характеристики. Зображення типового електрохімічного накопичувача представлено на рисунку 1.19.

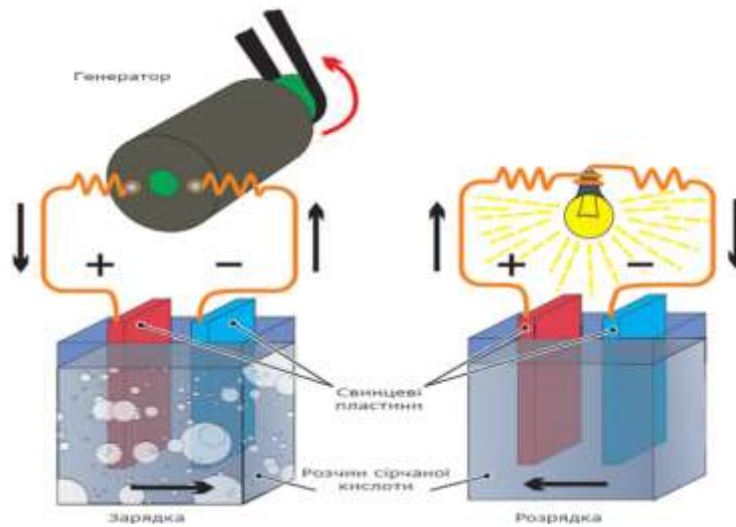


Рисунок 1.19 Принцип роботи акумулятора

Основними перевагами електрохімічних накопичувачів електроенергії є компактність конструкції, гнучкість у застосуванні, можливість точного контролю за процесами заряду та розряду, а також високий рівень питомої енергії, що дозволяє акумулювати значну кількість енергії в обмеженому об'ємі. Водночас, такі накопичувачі мають і певні недоліки: висока вартість, обмежений ресурс циклів заряд-розряд, зниження ефективності з часом, чутливість до умов експлуатації (температура, глибина розряду). Ці недоліки можуть бути частково компенсовані шляхом поєднання з іншими типами накопичувачів, зокрема з суперконденсаторами, які здатні оперативно компенсувати пікові навантаження, зменшуючи циклічне навантаження на акумулятор.

До найбільш перспективних типів електрохімічних накопичувачів належить сірчано-натрієвий акумулятор (NaS). Він є високотемпературною системою з робочою температурою близько 300–350 °С, при якій натрій і сірка перебувають у розплавленому стані. Акумулятор має анод з натрію, електролітом є β -оксид алюмінію з домішками, що забезпечує селективну провідність Na^+ -іонів, а катодна частина містить сірку в суміші з пористим графітом.

Під час заряду натрій окислюється на аноді до Na^+ , які проходять крізь твердий електроліт і реагують із сіркою, утворюючи полісульфіди натрію в катодному відсіку. У процесі розряду реакція відбувається у зворотному напрямку, що дозволяє відновити хімічну енергію у вигляді електричної. Такі акумулятори відзначаються високою енергоємністю (до 150–240 Вт·год/кг), високим ККД (до 85–90%) і тривалим терміном служби (до 4500 циклів). Структурна схема та принцип дії сірчано-натрієвого акумулятора зображені на рисунку 1.20.

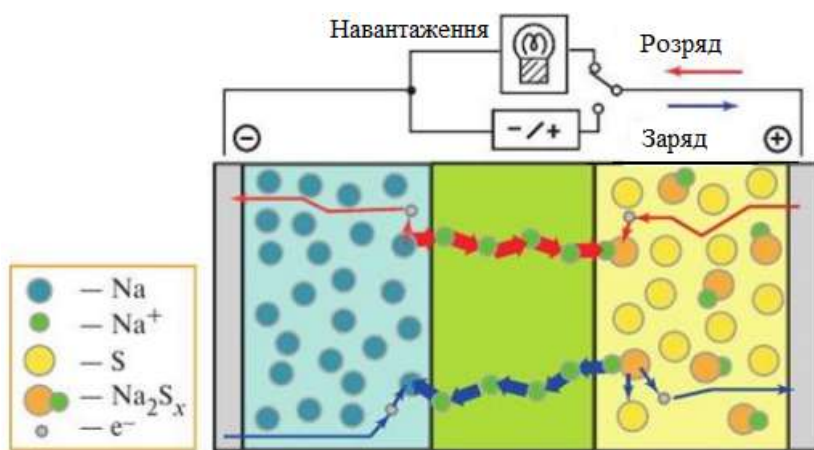


Рисунок 1.20 Принцип дії акумулятора NaS

Такі батареї найчастіше використовуються у великих стаціонарних системах накопичення електроенергії, зокрема в якості резервного джерела живлення для електричних мереж або для згладжування нерівномірностей генерації з ВДЕ. Прикладом є система, встановлена у містечку Президію,

штат Техас, у 2010 році, яка на той момент була найбільшою у світі натрієво-сірчаною батареєю. Вона забезпечувала 4 МВт електричної потужності протягом восьми годин, виконуючи роль буфера під час аварій на міській лінії електропередачі.

Натрієво-сірчані акумулятори особливо ефективні при взаємодії з джерелами генерації на основі ВДЕ, зокрема вітровими і сонячними електростанціями. Наприклад, в умовах сильного вітру та низького попиту на електроенергію, надлишок генерованої потужності може зберігатися в акумуляторах. У години пікового навантаження ця енергія повертається до енергосистеми, що дозволяє оптимізувати роботу мережі та зменшити залежність від традиційних маневрових джерел.

Серед електрохімічних накопичувачів широкого вжитку заслуговують на увагу свинцево-кислотні акумулятори. Вони вирізняються простотою конструкції, відносно низькою вартістю, стабільною роботою в різних умовах і високою питомою потужністю. Типовий ресурс таких батарей становить від 500 до 1000 циклів «заряд-розряд», залежно від режимів експлуатації.

Принцип роботи свинцево-кислотного акумулятора базується на електрохімічних реакціях між свинцем (Pb), діоксидом свинцю (PbO_2) та сірчаною кислотою (H_2SO_4). У зарядженому стані позитивний електрод утворено з PbO_2 , а негативний — з чистого свинцю. Під час розряду обидва електроди перетворюються на сульфат свинцю (PbSO_4), при цьому виділяється електроенергія. Під час заряду відбувається зворотна реакція. Конструктивна схема такого акумулятора наведена на рисунку 1.21.

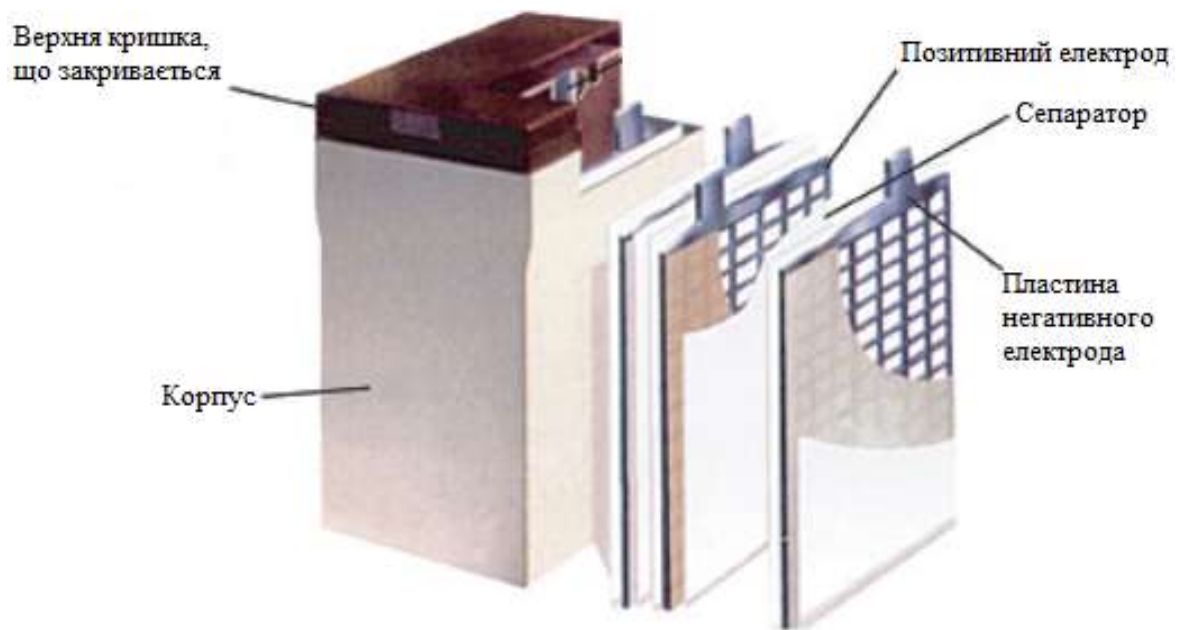


Рисунок 1.21 Принцип дії свинцево-кислотного акумулятора

Під час роботи свинцево-кислотного акумулятора, зокрема в процесі розряджання, відбуваються окисно-відновні реакції: активна маса позитивного електрода (PbO_2) та негативного електрода (Pb) вступає у хімічну реакцію з іонами сульфату в електроліті (розчин H_2SO_4), утворюючи сульфат свинцю (PbSO_4). У результаті цього процесу щільність електроліту зменшується, а сам електроліт втрачає свої властивості, що обумовлює зниження напруги на затискачах батареї. Протягом розряджання іони сірчаної кислоти рухаються до електродів, формуючи спрямований потік іонів, який в зовнішньому колі формує електричний струм.

При заряджанні акумулятора спостерігається зворотній процес: під дією зовнішнього джерела струму активна маса електродів відновлює свій первинний хімічний стан, при цьому сульфат свинцю на електродах розкладається, утворюючи знову PbO_2 на позитивному електроді та металевий свинець на негативному, а сірчана кислота повертається в електроліт, підвищуючи його щільність.

Свинцево-кислотні акумулятори застосовуються у системах безперебійного живлення (ДБЖ), охоронних і пожежних системах

сигналізації, у медичному обладнанні, а також як буферні джерела енергії для резервного живлення критично важливих споживачів. Завдяки стабільності роботи, простоті обслуговування та доступній вартості, вони залишаються одними з найпоширеніших у світі систем накопичення енергії.

Одним із найбільш сучасних і ефективних типів акумуляторів є літій-іонний акумулятор (Li-ion), який набув широкого застосування в побутовій електроніці, мобільних пристроях, електромобілях та стаціонарних системах накопичення енергії для енергетики. Його принцип роботи базується на русі іонів літію між анодом і катодом через електроліт у процесі заряджання та розряджання.

Конструктивно літій-іонний акумулятор складається з катоду, виготовленого на алюмінієвій фользі, та аноду, нанесеного на мідну фольгу, між якими знаходиться пористий сепаратор, насичений електролітом. (рисунок 1.22).

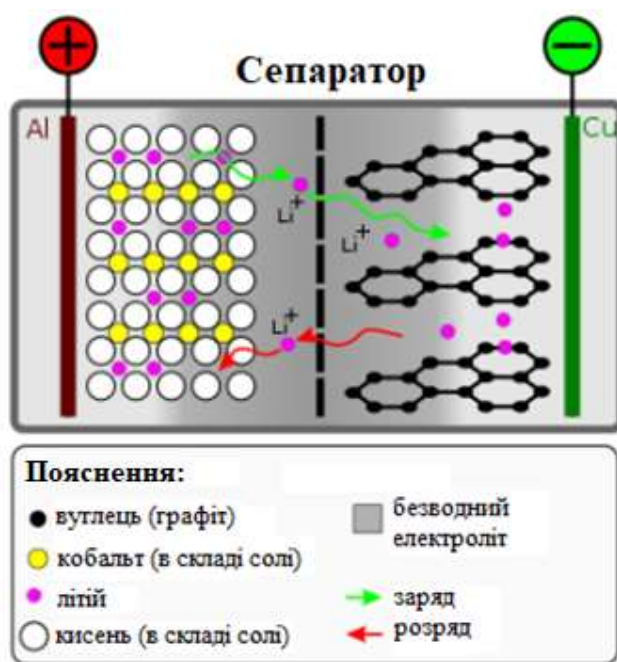


Рисунок 1.22 Літій-іонний акумулятор

У літій-іонному акумуляторі носієм заряду виступає позитивно заряджений іон літію (Li^+), здатний вбудовуватись у кристалічну структуру

матеріалів аноду та катоду — зокрема, графіту, оксидів та солей металів. Цей процес супроводжується утворенням хімічних зв'язків, завдяки чому забезпечується висока ефективність при багаторазових циклах заряджання та розряджання.

До основних переваг літій-іонних акумуляторів слід віднести високу питому енергію та потужність, тривалий термін експлуатації (висока кількість циклів), низький саморозряд, а також можливість використання різних хімічних сполук у складі електродів і електролітів для оптимізації робочих параметрів. Однак слід враховувати, що певні типи електролітів є токсичними, що вимагає спеціалізованих рішень для безпечної утилізації. Також до недоліків належить потреба у високотехнологічному виробництві для забезпечення високих експлуатаційних характеристик.

Завдяки великій питомій ємності, літій-іонні акумулятори ефективно використовуються в стаціонарних енергетичних системах малої та середньої потужності, зокрема у фотоелектричних системах. Проведений багатокритеріальний аналіз свідчить про те, що саме ці акумулятори є оптимальним рішенням для зберігання енергії від СЕС. Вони здатні ефективно компенсувати раптові зміни напруги та згладжувати її коливання, що виникають при підключенні або відключенні сонячної генерації.

Для забезпечення ефективної та безпечної експлуатації літій-іонні акумулятори комплектуються системою контролю та керування (Battery Management System — BMS), яка виконує функції моніторингу температури, напруги, струму, стану заряду та забезпечує балансування осередків. Окрім того, система включає спеціалізовані пристрої заряду/розряду для підтримки оптимальних умов роботи.

Останнім часом широкого поширення набули проточні акумуляторні системи, серед яких особливе місце займають ванадієві редокс-батареї. Цей тип акумулятора використовує електроліти, розчинені у воді сполуки ванадію, які циркулюють у двох окремих резервуарах, розділених

іонообмінною мембраною. Під час заряджання та розряджання відбувається переміщення іонів ванадію між різними станами окиснення (наприклад, $V^{2+} \rightleftharpoons V^{3+}$, $VO^{2+} \rightleftharpoons VO_2^{+}$). Такий принцип дії дозволяє ефективно зберігати великі обсяги енергії без деградації електродних матеріалів, а гнучкість масштабування забезпечує адаптацію під конкретні потреби споживача. Спрощена схема роботи ванадієвої редокс-батареї представлена на рисунку 1.23.

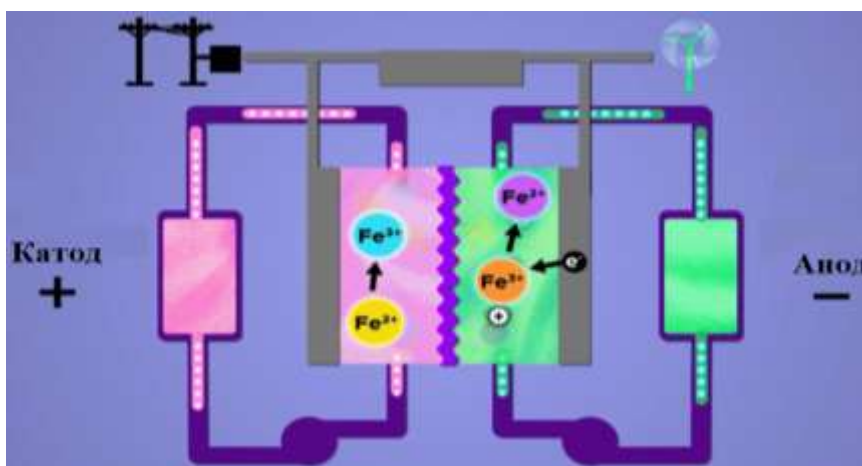


Рисунок 1.23 Схема проточної батареї

Ванадій (V) — хімічний елемент, здатний перебувати в чотирьох різних станах окиснення, що робить його надзвичайно придатним для використання у редокс-батареях. Завдяки здатності до оборотних окисно-відновних реакцій (між V^{2+} , V^{3+} , VO^{2+} , VO_2^{+}), ці батареї забезпечують ефективне накопичення та вивільнення електричної енергії. На відміну від літій-іонних акумуляторів, у яких хімічні реакції відбуваються безпосередньо з участю твердих електродів, ванадієві редокс-батареї не піддають електроди хімічній деградації, оскільки окисно-відновні процеси відбуваються в рідких електролітах. Це забезпечує значно довший термін служби батареї, стабільність її продуктивності та відсутність необхідності у частій заміні активних компонентів.

Завдяки своїм характеристикам, ванадієві редокс-батареї демонструють високий потенціал для інтеграції з джерелами відновлюваної енергії — зокрема, сонячними та вітровими електростанціями. Їх здатність до швидкого заряджання, тривала експлуатаційна надійність та ефективна підтримка стабільного живлення споживачів у періоди пікового попиту чи нестачі генерації робить ці системи перспективними для забезпечення енергетичної безпеки та гнучкості ОЕС.

При виборі систем зберігання електроенергії для конкретної енергетичної конфігурації необхідно здійснювати аналіз з урахуванням цілого комплексу параметрів. Зокрема, варто враховувати техніко-експлуатаційні характеристики як джерел генерації на основі ВДЕ, так і самих накопичувачів. Основні критерії оцінювання включають:

- питому потужність (Вт/кг),
- питому енергію (Вт·год/кг),
- питому вартість (\$/Вт·год),
- тривалість циклу заряду/розряду,
- кількість робочих циклів (термін служби),
- коефіцієнт корисної дії (ККД),
- ступінь саморозряду,
- рівень безпеки та пожежонебезпеки,
- складність або простоту експлуатаційного обслуговування.

У таблиці 1.1 наведено узагальнене порівняння типових систем накопичення енергії за вказаними параметрами, що дозволяє оцінити доцільність застосування того чи іншого типу накопичувача в залежності від завдань енергетичної системи.

Таблиця 1.1 Основні властивості, переваги та недоліки найуживаніших систем зберігання енергії

Тип СЗЕ	Підтип	Переваги	Недоліки	Потужність	ККД
Механічні	ГАЕС	Велика потужність, низька питома вартість, мала собівартість електроенергії	Складність розміщення, дороге і тривале будівництво, потреба у відповідному ландшафті, екологічні проблеми	100–5000 МВт	66–75 %
	Гравітаційні	Швидкість монтажу, дешевизна, придатні для посушливих регіонів	Складність механіки при збільшенні вантажу, втрати на трансмісії	40–150 МВт	75–80 %
	Стиснене повітря	Велика потужність, економічність	Залежність від геології місцевості, потенційна шкода довкіллю	5–300 МВт	50–89 %
Теплові	Природні	Акумуляція тепла з використанням у побутових потребах	Висока складність інженерної реалізації	30–50 МВт	70–80 %
	Адсорбційні	Перспектива щоденного та сезонного зберігання	Висока вартість, необхідність подальших досліджень	0–5 МВт	65–75 %
Хімічні	Водневі	Тривале зберігання, стабільність при зміні температур	Висока вартість інфраструктури, витоки, складність транспортування	0–50 МВт	20–35 %
	Метанові	Гнучкість у використанні (теплова й електрична генерація)	Висока вартість обладнання	1–1000 МВт	45–50 %
Електротехнічні	Суперконденсатори	Висока швидкість заряду і розряду, довговічність	Низька енергетична щільність	0–0,3 МВт	90–95 %

Тип СЗЕ	Підтип	Переваги	Недоліки	Потужність	ККД
Електрохімічні	Магнітні	Миттєва реакція, довгий ресурс	Висока вартість експлуатації	0,1–10 МВт	95–98 %
	NaS	Майже повна відсутність саморозряду	Робота при високих температурах, ризик займання	1 МВт	75 %
	Свинцево-кислотні	Дешевизна, зрілі технології	Низька енергетична щільність, низька ефективність за низьких температур	1 МВт	85 %
	Літій-іонні	Висока ефективність, щільність енергії, компактність	Обмежений термін служби, високі температурні вимоги, потреба в BMS	0,1–0,2 МВт	85–90 %
	Проточні	Висока безпека, можливість довготривалого використання	Низька питома енергія, залежність від температури, дорогі компоненти	0,2–0,3 МВт	60 %

Накопичувачі енергії, що інтегруються в енергомережу, можуть функціонувати в кількох основних режимах, які за потреби комбінуються між собою залежно від умов роботи системи. Перший із них — це черговий режим, у якому накопичувач не здійснює ані споживання електроенергії з мережі, ані її передачу до мережі, за винятком енергоспоживання для забезпечення власних потреб (наприклад, охолодження, систем керування тощо). У цьому режимі накопичувач перебуває в стані очікування команди до переходу в активний режим.

У режимі накопичення енергії пристрій виконує зарядку за умови відсутності потреби у віддачі енергії до мережі. За умови, що параметри електромережі залишаються в межах встановленого робочого діапазону (напруга, частота, гармоніки), накопичувач виконує зарядку з урахуванням

обмежень за споживаною потужністю. Ця межа зазвичай визначається системним оператором або задана відповідно до характеристик мережі та накопичувача.

У режимі передачі енергії до мережі відбувається перетворення постійної напруги від батарей у змінну напругу, яка синхронізується з електромережею за частотою, фазою та миттєвим значенням. Такий режим дозволяє ефективно покривати пікові навантаження, підтримувати баланс потужностей, стабілізувати параметри мережі.

Суміщені режими роботи — це комбінації вищезазначених режимів, які реалізуються залежно від призначення накопичувача, а також поточних параметрів електромережі. Такий підхід дозволяє оперативно адаптувати функціонування систем зберігання енергії до реальних умов і потреб енергосистеми.

Ключовими характеристиками для вибору сценаріїв застосування накопичувачів є щільність навантажень споживачів як у добовому, так і в річному розрізі, а також коливання графіків генерації електроенергії.

У випадках, коли метою є обмеження генерації відновлюваних джерел енергії через перевищення попиту або обмеження мережевої інфраструктури, накопичувачі розміщуються на стороні генерації. Вони дозволяють акумулювати надлишкову енергію, уникати примусового відключення СЕС чи ВЕС, а також вирівнювати профіль виробництва.

У випадках, коли необхідно забезпечити регулювання частоти, балансування потужності або оптимізацію потоків електроенергії в масштабах енергосистеми, накопичувачі встановлюються на рівні передавання електроенергії. Вони діють як буфер між виробниками і споживачами, допомагаючи підтримувати стабільність системи.

У розподілених системах або для мобільного зберігання енергії (наприклад, на об'єктах критичної інфраструктури або для автономних

споживачів) накопичувачі реалізуються на рівні розподілу енергії. У таких випадках вони відіграють роль резервного джерела живлення, забезпечують гнучке керування попитом і підвищують надійність енергопостачання.

Отже, технології накопичення енергії дедалі більше стають ключовим елементом переходу до енергосистем, орієнтованих на ВДЕ, забезпечуючи можливість перетворення їх на основне джерело енергії в майбутньому.

2 ЗАСТОСУВАННЯ ЛІТІЙ-ІОННИХ НАКОПИЧУВАЧІВ HUAWEI TECHNOLOGIES В ПРОЕКТІ

2.1 Опис ідеї застосування накопичувачів в проекті

Ідея запропонованої концепції полягає у впровадженні системи накопичення енергії для компенсації небалансів, спричинених нерівномірною генерацією відновлюваних джерел енергії, зокрема сонячної електростанції (СЕС). Запропоновано використання літій-іонної системи накопичення енергії, яка діятиме як буфер між генерацією та мережею, дозволяючи оперативно реагувати на коливання потужності в точці підключення.

Вихідні технічні параметри включають встановлену потужність СЕС на рівні 10 МВт, що відповідає сучасним середнім промисловим сонячним паркам. Для забезпечення ефективного балансування генерованої енергії передбачається введення в експлуатацію комплексу установки зберігання енергії (УЗЕ) на базі літій-іонних акумуляторів із встановленою потужністю 4 МВт. Це забезпечує достатню гнучкість для корекції короточасних коливань, зниження пікових навантажень, а також підтримку частоти та напруги у вузлі приєднання.

Літій-іонні накопичувачі обрано через їх високу питому енергоємність, високий ККД, тривалий ресурс за кількістю циклів, а також швидкість реакції на зміну режимів роботи енергосистеми. Комплекс УЗЕ на їх основі дозволяє реалізувати широкий спектр функцій: миттєву віддачу енергії у випадку дефіциту, поглинання надлишків у періоди надлишкової генерації, компенсацію реактивної потужності, а також згладжування добових коливань виробітку СЕС.

Впровадження подібної системи дає змогу забезпечити низку важливих переваг для користувача та для енергосистеми загалом. Зокрема, вона забезпечує:

- підтримку частоти в електромережі на допустимому рівні;
- зменшення небалансів між фактичною та прогнозованою генерацією;
- підвищення якості електроенергії в частині напруги та гармонік;
- інтеграцію в автоматизовані системи управління мережею (SCADA, BMS, EMS);
- можливість реалізації додаткових послуг на ринку системної гнучкості.

Становлення подібної інфраструктури дозволяє користувачеві не лише забезпечити стабільність та економічність роботи власної СЕС, а й активно інтегруватися в енергетичну екосистему, брати участь у ринку допоміжних послуг, впроваджувати інтелектуальні технології керування та сприяти сталому розвитку розподіленої генерації.

2.2 Загальна інформація про літєві накопичувачі електроенергії Huawei Technologies

Літій-іонні батареї і проточні батареї на даний момент є одними із найбільш комерційно життєздатних технологій для стаціонарних систем зберігання енергії, прогноз зміни їхньої вартості зображено на рисунку 2.1

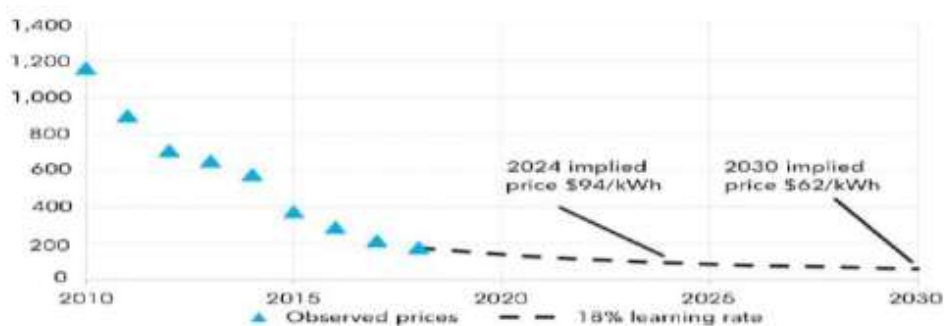


Рисунок 2.1 Прогноз зміни ціни модулів літій-іонних батарей

Особливої уваги заслуговують літій-іонні системи накопичення, вартість яких є суттєво нижчою порівняно з іншими технологіями, а тенденція до її подальшого зниження зберігається завдяки постійному впровадженню інноваційних рішень та вдосконаленню технологічних

процесів їхнього виробництва. На сьогодні більшість акумуляторних систем, впроваджених у сфері енергетики у світовому масштабі, базуються саме на літій-іонних акумуляторах. Це пояснюється насамперед їх високою питомою потужністю, зниженими експлуатаційними витратами та одним із найвищих коефіцієнтів корисної дії серед усіх типів накопичувачів енергії.

Літій-іонні акумулятори здатні акумулювати значні обсяги енергії, а також забезпечувати вивільнення потужності на рівні, необхідному для компенсації небалансів у енергосистемах. Їх застосування дозволяє ефективно підтримувати стійкість мережі, зменшувати частотні коливання, а також забезпечувати резервування та гнучкість у роботі вузлів генерації на основі відновлюваних джерел.

Яскравим прикладом реалізації промислових систем зберігання енергії є комплекси виробництва компанії *Huawei Technologies*, в яких акумулювальні системи інтегруються в повнофункціональну архітектуру, що включає:

- інтелектуальні стрингові установки зберігання енергії (УЗЕ);
- розподільчий щит постійного струму (DC Distribution Cabinet);
- систему інтелектуального перетворення енергії на основі перетворювачів напруги;
- розумний контролер з функціями моніторингу, самодіагностики та керування;
- підвищуючий трансформатор, призначений для інтеграції системи в мережу середньої або високої напруги (рисунок 2.1).

Ці модулі утворюють єдиний адаптивний комплекс, здатний виконувати широкий спектр завдань у складі сучасної електроенергетичної інфраструктури, зокрема в умовах інтенсивного розвитку ВДЕ та зростаючих вимог до стабільності енергопостачання.

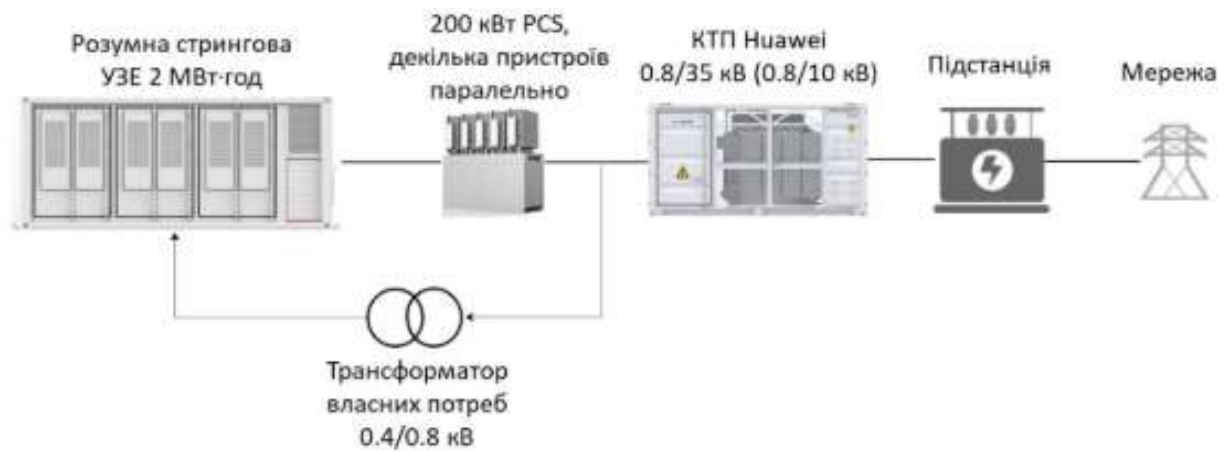


Рисунок 2.2 Будова УЗЕ

Накопичувачі енергії, розроблені компанією *Huawei Technologies*, належать до категорії літій-іонних систем, у складі яких використовуються літій-залізо-фосфатні акумуляторні елементи (LiFePO_4). Ці елементи згруповані в модульні блоки, що зібрані у вертикальні стійки, забезпечуючи високу щільність зберігання енергії та зручність монтажу.

Ключовою ланкою у складі комплексної системи зберігання є розумні стрингові установки зберігання енергії (УЗЕ) (рисунок 2.3), які виконують функції централізованого зберігання, моніторингу та управління енергією. Саме вони забезпечують адаптивність системи до змін навантаження, надійність функціонування в умовах змінних погодних умов і безпеку експлуатації.

До складу УЗЕ входить комплекс підсистем, кожна з яких виконує визначені функціональні завдання:

- система керування акумулятором (Battery Management System, BMS), яка забезпечує контроль напруги, температури, струму заряджання/розряджання, балансування комірок, а також захист від перевантажень і несправностей;

- система опалення, вентиляції та кондиціонування повітря (HVAC), що підтримує оптимальний температурний режим функціонування

аккумуляторів, необхідний для продовження терміну служби та уникнення перегріву;

- система освітлення, яка забезпечує безпечне обслуговування накопичувальної установки в темний період доби або при надзвичайних ситуаціях;

- система виявлення пожежі та автоматична система пожежогасіння, реалізована за допомогою датчиків диму, температури і автоматичних модулів локалізації займання, що гарантує протипожежну безпеку в разі аварійної ситуації;

- система безпеки та система аварійних ситуацій, яка передбачає наявність багаторівневого захисту, включаючи відеоспостереження, сигнали тривоги, контроль доступу;

- пристрої захисту від перенапруги (SPD), пристрої захисту заземлення та пристрої виявлення несправностей заземлення, які унеможливають негативний вплив грозових розрядів, коливань напруги, струмів витоку або коротких замикань, і тим самим підвищують надійність експлуатації.

Таким чином, стрингова система УЗЕ від *Huawei Technologies* є повнофункціональним енергоакумулювальним комплексом, який відповідає сучасним вимогам гнучкості, надійності, безпеки й ефективності для промислових та енергетичних застосувань.



Рисунок 2.3 Зовнішній вигляд LUNA2000-2.0MWH-1H1

У таблиці 2.1 представлено ключові технічні характеристики установки зберігання енергії виробництва Huawei Technologies, яка призначена для оперативного реагування на небаланси в роботі сонячної електростанції шляхом короткочасного споживання або віддачі електроенергії. Центральним елементом цієї системи є система керування акумулятором, яка реалізується через три функціональні блоки.

Таблиця 2.1 технічні характеристики УЗЕ LUNA2000-2.0MWH-1H1

Параметр	Значення
Номінальна напруга на стороні шини DCDC	1250 В
Кількість блоків акумуляторів на стійку	21 акумуляторна батарея, підключена послідовно
Номінальна потужність	3 × 338 кВт (елементи 280 А·год)
Кількість стійок в контейнері	6
Живлення власних потреб	380/220 В АС
Вага	30 тонн
Номінальний струм заряду/розряду	3 × 275,2 А

Перший – блок моніторингу акумулятора – відповідає за безперервне збирання інформації про параметри роботи кожного акумуляторного модуля, забезпечує контроль стану та реалізує пасивне балансування електрохімічних елементів.

Другий – блок керування акумулятором – акумулює дані з блоків моніторингу, аналізує напругу та струм усієї стійки, генерує аварійні сповіщення, забезпечує захист під час заряду та розряду.

Третій – центральний блок моніторингу – координує взаємодію між двома попередніми блоками, здійснює обчислення, обробку аварійних ситуацій, архівацію даних та балансування навантаження між стійками.

Конструкція стрингової УЗЕ передбачає підтримання стабільного мікроклімату всередині контейнера. Для цього застосовується інтелектуальна система охолодження й опалення, що реалізована на базі промислових кондиціонерів із розподіленим управлінням температурою, які монтуються безпосередньо в дверях контейнера. Такий підхід забезпечує ефективне теплорегулювання навіть у складних кліматичних умовах.

Завдяки тепловому числовому моделюванню, проведеному інженерами Huawei, конструкцію УЗЕ оптимізовано для забезпечення ефективного теплообміну з урахуванням різних сценаріїв експлуатації – як при високих, так і при низьких температурах.

Установка зберігання енергії також оснащена централізованою системою пожежогасіння, що включає: балон з вогнегасною речовиною, мережу трубопроводів з розпилювачами, сигнальні датчики, систему зворотного зв'язку, блок керування, кнопку аварійного запуску, звукову сирену та індикатор викиду газу.

Окрему важливу функцію виконує система перетворення потужності, що відповідає за перетворення змінного струму в постійний (AC–DC). Вона реалізована у вигляді модульного рішення з можливістю встановлення поза межами контейнера, що значно спрощує технічне обслуговування. Монтаж

системи здійснюється у верхній частині розподільчого щита постійного струму (рисунок 2.4).



Рисунок 2.4 Шафа збору потужності

Пристроєм зв'язку у масиві накопичення електроенергії є інтелектуальний контролер масив, що збирає дані з пристроїв і повідомляє про дані серверу моніторингу через волоконну кільцеву мережу.

2.3 Розрахунок обладнання КТП

Для збору та передачі потужності УЗЕ на території об'єкту передбачено встановлення КТП-10/0,8-6300 кВА.

КТП розділена всередині на три основні відсіки: відсік силового трансформатора, відсік РУ-10 кВ, відсік РУ-0,8 кВ.

КТП призначена для отримання та розподілу електроенергії, яку вона отримає від зовнішньої мережі, від СЕС, та для того, щоб у момент, коли СЕС створює позитивний небаланс УЗЕ на території об'єкту накопичували енергію і заряджалися, а потім розряджалися коли виникає негативний

небаланс віддавали електроенергію в зовнішню мережу, при цьому беручи участь в регулюванні потужності, а від так частоти.

Найважливішою частиною КТП є трансформатор, в нашому випадку передбачено встановлення однотрансформаторної підстанції. Визначальним у даному випадку є нормальний режим систематичних навантажень. Вибір технічно доцільної потужності $S_{T.ном}$ двохобмоткового трансформатору здійснюється за формулою :

$$S_{y3E} \leq S_{T.ном}, \quad (2.1)$$

де S_{y3E} - приєднана потужність комплексу споруд УЗЕ, $S_{y3E} = 4000$ кВА .

Технічно доцільна потужність окрім розрахункового навантаження обирається за рекомендованим коефіцієнтам економічного завантаження трансформаторів, який для однотрансформаторних підстанцій відповідно складає $k_{ez} = 0,75$.

$$\frac{S_{y3E}}{k_{ez}} \leq S_{T.ном}, \quad (2.2)$$

$$5333 \text{ кВА} \leq 6300 \text{ кВА} .$$

Тому обираємо трансформатор ТСЗ 6300 10/0,8 кВ.

Для правильного функціонування КТП необхідно правильно обрати комутаційне обладнання, це вимикачі, роз'єднувачі, вимірювальні трансформатори, пристрої захисту від комутаційних та грозових перенапруг.

Проведемо вибір обладнання РУ-10 кВ.

Вибір вимикача, вибираємо вакуумний вимикач VD4 12.12.25.

- за напругою обладнання:

$$U_{\text{ном.в}} \leq U_{\text{ном.м}} , \quad (2.3)$$

$$10 \text{ кВ} \leq 10 \text{ кВ} .$$

- за номінальним робочим струмом:

$$I_{\text{ном.роб}} \leq I_{\text{ном.в}} , \quad (2.4)$$

де $I_{\text{ном.роб}}$ - номінальний робочий струм, що проходить через комірку КТП 10 кВ, і визначається наступним чином:

$$I_{\text{ном.роб}} = \frac{S_{\text{УЗЕ}}}{\sqrt{3} \cdot \cos \varphi \cdot U_{\text{ном}}} , \quad (2.5)$$

де $S_{\text{УЗЕ}}$ - приєднана потужність комплексу споруд УЗЕ, $S_{\text{УЗЕ}} = 4000 \text{ кВА}$,

$\cos \varphi$ - коефіцієнт потужності УЗЕ, $\cos \varphi = 0,9$,

$U_{\text{ном}}$ - номінальна напруга ВН, $U_{\text{ном}} = 10 \text{ кВ}$.

$$I_{\text{ном.роб}} = \frac{4000}{\sqrt{3} \cdot 0.9 \cdot 10} = 256,60 \text{ А} .$$

$$256,60 \text{ А} \leq 630 \text{ А} .$$

Вибір роз'єднувача, вибираємо роз'єднувач РВЗ-10/630-І-УЗ.

- за напругою обладнання:

$$U_{\text{ном.р}} \leq U_{\text{ном.м}} , \quad (2.6)$$

$$10 \text{ кВ} \leq 10 \text{ кВ} .$$

- за номінальним робочим струмом:

$$I_{\text{ном.роб}} \leq I_{\text{ном.р}}, \quad (2.7)$$

$$256,60 \text{ А} \leq 630 \text{ А}.$$

Вибір вимірювальних трансформаторів.

Вибираємо трансформатори струму ТОЛУ-10-2 кВ 300/5.

- за напругою обладнання:

$$U_{\text{ном.тс}} \leq U_{\text{ном.м}}, \quad (2.8)$$

$$10 \text{ кВ} \leq 10 \text{ кВ}.$$

- за номінальним робочим струмом:

$$I_{\text{ном.роб}} \leq I_{\text{ном.тс}}, \quad (2.9)$$

$$256,60 \text{ А} \leq 630 \text{ А}.$$

Вибираємо трансформатор напруги 3хIVS1F.

- за напругою обладнання:

$$U_{\text{ном.тн}} \leq U_{\text{ном.м}}, \quad (2.10)$$

$$10 \text{ кВ} \leq 10 \text{ кВ}.$$

Вибір ОПН, вибираємо ОПН ОПН-10/12/10/550-УХЛ1.

- за найбільшою робочою напругою:

$$\frac{U_{\text{нрм}}}{K(t)} \leq U_{\text{нро}}, \quad (2.11)$$

де $U_{\text{нро}}$ - найбільша тривало допустима робоча напруга, $U_{\text{нро}} = 12 \text{ кВ}$,

$U_{\text{нрм}}$ - найбільша лінійна тривало допустима робоча напруга електричної мереж, $U_{\text{нрм}} = 12 \text{ кВ}$,

$K(t)$ - коефіцієнт, що дорівнює відношенню допустимого виробником підвищення напруги протягом часу t до $U_{\text{нро}}$ згідно $K(t) = 1,4$.

$$8.2 \text{ кВ} \leq 12 \text{ кВ}.$$

- за довжиною шляху витоку:

$$L_{\text{вит.роз}} \leq L_{\text{вит.ОПН}}, \quad (2.12)$$

де $L_{\text{вит.ОПН}}$ - довжина шляху витоку ОПН, $L_{\text{вит.ОПН}} = 28 \text{ см}$,

$L_{\text{вит.роз}}$ - розрахункова довжина шляху витоку ОПН, що визначається наступним чином:

$$L_{\text{вит.роз}} = \lambda_{\text{п.вит}} \cdot U_{\text{нрм}} \cdot K_i, \quad (2.13)$$

де $\lambda_{\text{п.вит}}$ - питома довжина шляху витоку зовнішньої ізоляції для ступеня забрудненості атмосфери, $\lambda_{\text{п.вит}} = 1,9 \text{ см/кВ}$,

K_i - коефіцієнт використання довжини шляху витоку, $K_i = 1,0$.

$$L_{\text{вит.роз}} = 1,9 \cdot 12 \cdot 1,0 = 22,8 \text{ мм},$$

$$22,8 \text{ см} \leq 28 \text{ см}.$$

Для можливості захисного відключення в системах 6, 10 кВ використовуються трансформатори струму нульової послідовності, вибираємо трансформатор ТЗЛУ-205 30/1.

Проведемо вибір обладнання РУ-0,8 кВ.

Вибір ввідного автомата до секції 0,8 кВ, вибираємо ЕР 440 СВ Зр 4000А ЕТІ 30007.

- за напругою обладнання:

$$U_{\text{ном.в}} \leq U_{\text{ном.м}}, \quad (2.14)$$

$$0,8 \text{ кВ} \leq 0,8 \text{ кВ}.$$

- за номінальним робочим струмом:

$$I_{\text{ном.роб}} \leq I_{\text{ном.в}}, \quad (2.15)$$

де $I_{\text{ном.роб}}$ - номінальний робочий струм, що проходить через комірку КТП 10 кВ, і визначається наступним чином:

$$I_{\text{ном.роб}} = \frac{S_{\text{узе}}}{\sqrt{3} \cdot \cos \varphi \cdot U_{\text{ном}}}, \quad (2.16)$$

де $S_{\text{узе}}$ - приєднана потужність комплексу споруд УЗЕ, $S_{\text{узе}} = 4000 \text{ кВА}$,

$\cos \varphi$ - коефіцієнт потужності УЗЕ, $\cos \varphi = 0,9$,

$U_{\text{ном}}$ - номінальна напруга ВН, $U_{\text{ном}} = 0,8 \text{ кВ}$.

$$I_{\text{ном.роб}} = \frac{4000}{\sqrt{3} \cdot 0,9 \cdot 0,8} = 3208 \text{ А}.$$

$$3208 \text{ А} \leq 4000 \text{ А}.$$

Вибір ввідного автомата до контейнерів шафи збору потужності, вибираємо 3WA1110-8AB32-4EA4-Z T40.

- за напругою обладнання:

$$U_{\text{ном.в}} \leq U_{\text{ном.м}}, \quad (2.17)$$
$$0,8 \text{ кВ} \leq 0,8 \text{ кВ}.$$

- за номінальним робочим струмом:

$$I_{\text{ном.роб}} \leq I_{\text{ном.в}}, \quad (2.18)$$

де $I_{\text{ном.роб}}$ - номінальний робочий струм, що проходить через комірку КТП 10 кВ до шаф збору потужності УЗЕ і визначається наступним чином:

$$I_{\text{ном.роб}} = \frac{S_{\text{УЗЕн}}}{\sqrt{3} \cdot \cos \varphi \cdot U_{\text{ном}}}, \quad (2.19)$$

де $S_{\text{УЗЕ}}$ - приєднана потужність комплексу споруд УЗЕ, $S_{\text{УЗЕн}} = 1000 \text{ кВА}$,

$\cos \varphi$ - коефіцієнт потужності УЗЕ, $\cos \varphi = 0,9$,

$U_{\text{ном}}$ - номінальна напруга ВН, $U_{\text{ном}} = 0,8 \text{ кВ}$.

$$I_{\text{ном.роб}} = \frac{1000}{\sqrt{3} \cdot 0,9 \cdot 0,8} = 801,88 \text{ А}.$$

$$801,88 \text{ А} \leq 1000 \text{ А}.$$

Вибір вимірювальних трансформаторів.

Вибираємо трансформатори струму ТАТ081.

- за напругою обладнання:

$$U_{\text{ном.тс}} \leq U_{\text{ном.м}}, \quad (2.20)$$

$$0,8 \text{ кВ} \leq 0,8 \text{ кВ}.$$

- за номінальним робочим струмом:

$$I_{\text{ном.роб}} \leq I_{\text{ном.тс}}, \quad (2.21)$$

$$801,88 \text{ А} \leq 1000 \text{ А}.$$

Вибираємо трансформатор напруги ТТВ020.

- за напругою обладнання:

$$U_{\text{ном.тн}} \leq U_{\text{ном.м}}, \quad (2.22)$$

$$0,8 \text{ кВ} \leq 0,8 \text{ кВ}.$$

Вибір вимикача-роз'єднувача, вибираємо вимикач-роз'єднувач Smart ARS pro-PV.

- за напругою обладнання:

$$U_{\text{ном.вн}} \leq U_{\text{ном.м}}, \quad (2.23)$$

$$0,8 \text{ кВ} \leq 0,8 \text{ кВ}.$$

- за номінальним робочим струмом:

$$I_{\text{ном.роб}} \leq I_{\text{ном.вн}}, \quad (2.24)$$

де $I_{\text{ном.роб}}$ - номінальний робочий струм, що проходить через шафу збору потужності УЗЕ до систем перетворення потужності, і визначається наступним чином:

$$I_{\text{ном.роб}} = \frac{S_{\Pi}}{\sqrt{3} \cdot \cos \varphi \cdot U_{\text{ном}}}, \quad (2.25)$$

де $S_{\text{УЗЕ}}$ - приєднана потужність комплексу споруд УЗЕ, $S_{\Pi} = 200$ кВА,

$\cos \varphi$ - коефіцієнт потужності УЗЕ, $\cos \varphi = 0,9$,

$U_{\text{ном}}$ - номінальна напруга ВН, $U_{\text{ном}} = 0,8$ кВ.

$$I_{\text{ном.роб}} = \frac{200}{\sqrt{3} \cdot 0,9 \cdot 0,8} = 160,38 \text{ А}.$$

$$160,38 \text{ А} \leq 250 \text{ А}.$$

Для живлення навантажень 0,8 кВ власних потреб (ТВП), УЗЕ необхідно встановити трансформатор ТМ 25-0,8/0,4 кВ. Нище в таблицях 2.2 та 2.3 показані комірки в КТП, та обладнання, яке там розміщується.

Таблиця 2.2 Обладнання РУ-10 кВ

Номер комірки	Призначення комірки	Найменування обладнання	Тип обладнання
1	Комірка трансформатора Т	Вимикач вакуумний 10 кВ	VD4 12.12.25 P150
1	Комірка трансформатора Т	Роз'єднувач 10 кВ	PB3-10/630-I-Y3
		Обмежувач перенапруг 10 кВ	ОПН-10/12/10/550- УХЛ1
		Трансформатор струму 10 кВ	ТОЛУ-10-2 кВ 300/5 0,5S/10P/10P 10/10/20 ВА
		Трансформатор напруги 10 кВ	3xIVS1F 10000:V3/100:V3/100:3

			0.5/6P 50/50 B
		Трансформатор струму нульової послідовності	ТЗЛУ-205 30/1

Таблиця 2.3 Обладнання РУ-0,8 кВ

Номер комірки	Призначення комірки	Найменування обладнання	Тип обладнання
1	Ввідна комірка	Автоматичний вимикач	EP 440 SB 3p 4000A ETI 30007
2	Лінійна комірка	Автоматичний вимикач	3WA1110-8AB32- 4EA4-Z T40
		Вертикальний вимикач- роз'єднувач	Smart ARS pro-PV
		Трансформатор напруги	TTV020 800/100B
		Трансформатор струму	TAT081 400/5 0,5 5 BA
3	Лінійна комірка	Автоматичний вимикач	3WA1110-8AB32- 4EA4-Z T40
		Вертикальний вимикач- роз'єднувач	Smart ARS pro-PV
		Трансформатор напруги	iPRD40 40/15kA 350V 3P+N
		Трансформатор струму	TTV020 800/100B
4	Лінійна комірка	Автоматичний	3WA1110-8AB32- 4EA4-Z T40

		вимикач	
		Вертикальний вимикач- роз'єднувач	Smart ARS pro-PV
		Трансформатор напруги	iPRD40 40/15kA 350V 3P+N
		Трансформатор струму	TTV020 800/100B
5	Лінійна комірка	Автоматичний вимикач	3WA1110-8AB32- 4EA4-Z T40
		Вертикальний вимикач- роз'єднувач	Smart ARS pro-PV
		Трансформатор напруги	iPRD40 40/15kA 350V 3P+N
		Трансформатор струму	TTV020 800/100B
6	Комірка ТВП	Трансформатор власних потреб	ТМ 25 кВА

Основні показники електричної частин будь-яких енергооб'єктів в енергосистемі такі як надійність, економічність, ремонтоздатність, безпеку обслуговування, зручність експлуатації.

УЗЕ на території об'єкту комплектується шафою збору потужності, відстань між контейнерами УЗЕ, та між УЗЕ та шафою збору потужності рекомендована компанією Huawei Technologies для зручності та для безпеки обслуговування.

Головна електрична схема КТП-10/0,8 кВ та план території об'єкту із системами зберігання енергії зображені на рисунках 2.5, 2.6.

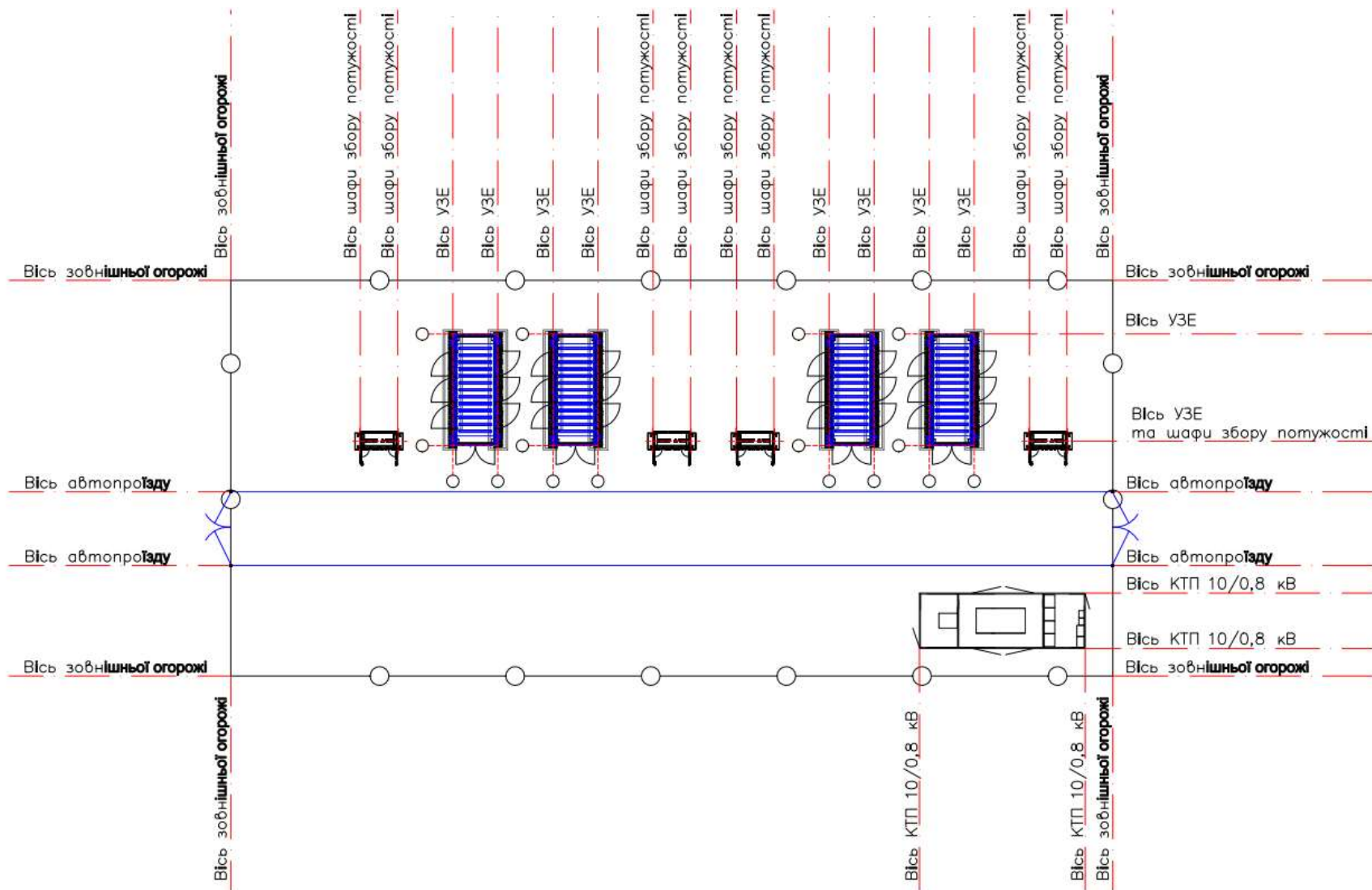


Рисунок 2.6 План території об'єкту

З ЕКОНОМІЧНЕ ОБГРУНТУВАННЯ ВИКОРИСТАННЯ НАКОПИЧУВАЧІВ

3.1 Місце ВДЕ на ринку електричної енергії

Функціонування електроенергетичної галузі в сучасних умовах ґрунтується на ринкових засадах, що зумовлює істотні вимоги до рівня підготовки інженерно-технічних фахівців і управлінського персоналу. Компетенції в галузі моделювання, розрахунків елементів ціноутворення та тарифікації є не лише необхідними, а й ключовими у структурі як виробництва, так і споживання електроенергії. Знання цих процесів забезпечує ефективне управління енергетичними ресурсами, оптимізацію витрат і прийняття обґрунтованих економічних рішень у сфері електроенергетики.

Усі категорії споживачів електроенергії – комунальні, промислові, державні – діють у межах ринку електричної енергії, де між ними виникають ринкові взаємовідносини. Основними серед них є процеси купівлі-продажу електроенергії, надання послуг з її передачі та розподілу. У цьому контексті ринок виступає механізмом, який забезпечує взаємодію між виробниками та споживачами енергетичного ресурсу.

Функціонування ринку електроенергії має низку особливостей, що зумовлені специфікою технологічної структури енергетичної галузі. Серед них варто виокремити кілька ключових аспектів:

- Територіальна обмеженість ринків для виробників електроенергії, яка обумовлена необхідністю транспортування енергії виключно електричними або тепловими мережами. Це накладає суттєві обмеження на мобільність продукції та формує регіональні енергетичні кластери.
- Безперервність виробничого процесу, яка передбачає жорстку синхронізацію виробництва та споживання в режимі реального часу. Відсутність значних можливостей для зберігання електроенергії робить необхідним постійне балансування навантажень і генерації, що потребує

оперативного регулювання та автоматизованого диспетчерського управління.

– Інтегрованість енергетичних підприємств в єдину енергосистему, що зумовлює потребу у координації їхньої діяльності в межах загальнонаціонального енергетичного простору. Це, у свою чергу, вимагає розробки тарифних методик, укладання контрактів, формування балансів генерації і споживання та контролю за їх виконанням.

– Стратегічне значення енергетики для держави, що проявляється у її впливі на економіку, національну безпеку та обороноздатність. Це обумовлює необхідність наявності договірної системи відносин між суб'єктами ринку, що регулюється державою на основі чітко визначених процедур щодо постачання електроенергії та формування цінової політики.

Розвиток українського ринку електроенергії здійснюється з урахуванням світового досвіду, зокрема країн Європейського Союзу, та з адаптацією до умов роботи Об'єднаної енергосистеми України. Основна мета – забезпечення безперебійного, надійного і ефективного енергопостачання кінцевих споживачів у межах конкурентного середовища.

З 1 липня 2019 року в Україні функціонує лібералізована модель ринку електроенергії, що відповідає європейським стандартам і є частиною імплементації вимог Третього енергетичного пакета ЄС. Ця модель передбачає розмежування функцій генерації, передачі, розподілу і постачання електроенергії, надаючи можливість кожному споживачу вільно обирати постачальника електроенергії.

Структура лібералізованого ринку електроенергії України, яка включає різні сегменти (ринок двосторонніх договорів, ринок "на добу наперед", внутрішньодобовий ринок, балансуючий ринок, допоміжні послуги), представлена на рисунку 3.1.



Рисунок 3.1 – Структура лібералізованого ринку електричної енергії

Відповідно до положень Закону України «Про ринок електричної енергії», стратегічний розвиток електроенергетичного комплексу України передбачає поступове збільшення частки відновлюваних джерел енергії (ВДЕ) у загальній структурі Об'єднаної енергетичної системи (ОЕС). При цьому враховується специфіка функціонування джерел ВДЕ, для яких характерним є різко нерівномірний графік покриття навантаження. Такі нерівномірності пов'язані з високою залежністю генерації електроенергії від поточних метеорологічних умов: рівня сонячної радіації, ступеня хмарності, швидкості вітру тощо. Це ускладнює прогнозування обсягів виробництва електроенергії, що є критично важливим в умовах роботи на ринку.

Власники електроенергоустановок, які працюють на базі ВДЕ, зобов'язані подавати прогнозні графіки вироблення електроенергії. Утім, через складність точного передбачення погодних умов часто виникають

похибки прогнозування, що призводить до утворення небалансів – розбіжностей між фактичним та прогнозованим обсягами генерації або споживання електроенергії.

Небаланси можуть бути двох типів – позитивні та негативні, залежно від того, чи переважає виробництво над споживанням або навпаки.

- Позитивний небаланс має місце тоді, коли:
 - фактичний відпуск електроенергії перевищує запланований до продажу обсяг;
 - фактичне споживання менше за обсяг закупленої електроенергії.

Іншими словами, позитивний небаланс — це надлишок електроенергії, що не була реалізована або спожита.

- Негативний небаланс виникає у випадку, коли:
 - фактичний відпуск менший за запланований;
 - фактичне споживання перевищує закуплений обсяг.

Таким чином, негативний небаланс — це дефіцит енергії, який вимагає її докупівлі для покриття потреб споживача.

Фінансові наслідки небалансів визначаються оператором системи передачі (ОСП), яким в Україні є НЕК «Укренерго». Відповідно до чинної нормативно-правової бази:

- У випадку позитивного небалансу ОСП зобов’язується викупити надлишок електроенергії, але за заниженими розрахунковими цінами, які суттєво нижчі за ціни інших сегментів ринку.
- У випадку негативного небалансу необхідно докупити електроенергію за підвищеними тарифами. Вартість цієї енергії покладається на сторону, відповідальну за баланс.

Визначення сторони, відповідальної за баланс, є фундаментальним для розуміння розподілу відповідальності в ринковій моделі. Така сторона несе зобов’язання щодо відповідності між прогнозованим та фактичним обсягом генерації або споживання.

Загалом небаланси становлять серйозну проблему для енергосистеми, оскільки порушують нормальний режим її функціонування. Виникає необхідність оперативного втручання для приведення системи до стану рівноваги. Однак складність полягає в тому, що для цього потрібні маневрові потужності, здатні компенсувати коливання графіків навантаження, спричинених нестабільною генерацією ВДЕ.

Особливої гостроти проблема набуває для самих виробників «зеленої» електроенергії. У разі формування значних небалансів об'єкти ВДЕ можуть бути примусово відключені від енергосистеми відповідно до розпоряджень диспетчерської служби. Це знижує ефективність інвестицій у ВДЕ, а також створює ризики для рентабельності їх роботи на ринку електроенергії.

Враховуючи зазначене, особливу актуальність набуває впровадження систем накопичення енергії, які здатні згладжувати пікові навантаження, компенсувати похибки прогнозування та підтримувати стабільність роботи енергосистеми в умовах зростання частки ВДЕ.

3.2 Економічна ідея застосування накопичувачів електричної енергії

Нерегульований та складно прогнозований характер генерації електроенергії з відновлюваних джерел, зокрема сонячних (СЕС) та вітрових електростанцій (ВЕС), об'єктивно формує потребу в широкомасштабному впровадженні систем зберігання енергії (СЗЕ) для забезпечення стійкості та надійності функціонування енергосистеми. Системи зберігання повинні створити багаторівневу архітектуру підтримки безпеки режимів, адаптовану до різних часових масштабів та характеру змін у балансі виробництва й споживання електроенергії.

Основними напрямками такої підтримки є:

- сезонне регулювання балансу генерації та споживання, що дозволяє компенсувати міжсезонні диспропорції між надлишком генерації в

окремі періоди року (наприклад, у весняно-літній період для СЕС) та дефіцитом у інші;

- добове регулювання балансу, яке спрямоване на вирівнювання графіків генерації або споживання в межах однієї доби, дозволяючи, зокрема, усувати нічні провали у виробництві СЕС або згладжувати ранкові та вечірні піки споживання;
- регулювання в межах розрахункової години, що передбачає оптимізацію профілю навантаження або генерації у часових інтервалах до 60 хвилин, дозволяючи швидко реагувати на короткочасні коливання;
- регулювання в межах 15-хвилинного інтервалу реального часу, що має особливе значення для підвищення точності балансування на рівні оперативного диспетчерського управління;
- локальне вирівнювання графіків у точках комерційного обліку, що дозволяє зменшити локальні небаланси в мікрорегіонах або на вузлових підстанціях.

Крім того, серед потенційно перспективних застосувань СЗЕ виділяється керування перевантаженнями системоутворювальних електричних перетинів, а також оптимізація роботи розподільчих мереж, які особливо чутливі до коливань генерації від ВДЕ.

У коротко- та середньостроковій перспективі ключовими завданнями СЗЕ будуть:

- участь у балансуєчому ринку (БР);
- регулювання частоти в режимі реального часу через оперативне надання резервів первинного, вторинного або третинного регулювання.

Надання таких послуг можливе за умови масового розгортання СЗЕ на рівні підстанцій з невеликою ємністю, яка не створює істотного впливу на загальний режим функціонування Об'єднаної енергетичної системи України або локальної мережі в точці приєднання. Такий підхід дозволяє

децентралізувати функції стабілізації енергосистеми, підвищити надійність регіонального електропостачання та зменшити необхідність у будівництві резервних генеруючих потужностей.

Однак перспективність таких рішень має бути обґрунтована з економічної точки зору, враховуючи:

- високу вартість придбання, монтажу та обслуговування СЗЕ;
- обмежений термін служби акумуляторних технологій, особливо в умовах інтенсивної експлуатації;
- потребу у спеціалізованій інфраструктурі управління та контролю (СКУ, BMS).

Таким чином, впровадження СЗЕ є технічно доцільним кроком для інтеграції ВДЕ в національну енергосистему, проте реалізація таких рішень має відбуватися на основі комплексного техніко-економічного аналізу з урахуванням експлуатаційних, фінансових і регуляторних обмежень.

3.3 Обґрунтування додаткової стимуляції використання накопичувачів електричної енергії

Потенційний інвестор у сфері відновлюваної енергетики, зацікавлений у максимізації прибутку, зосереджується насамперед на умовах ринку, які дозволяють забезпечити швидке повернення вкладених коштів та стабільний грошовий потік. У цьому контексті ****«зелений» тариф**** виступає ключовим інструментом стимулювання інвестицій. Його головною перевагою є гарантована державою закупівля електроенергії, виробленої з ВДЕ, за фіксованими підвищеними тарифами, незалежно від поточної ринкової кон'юнктури. Саме ця модель дала поштовх до масового будівництва СЕС та ВЕС, що спричинило вибухоподібне зростання встановленої потужності у секторі ВДЕ.

Однак стрімкий розвиток відновлювальної енергетики супроводжується низкою системних викликів, серед яких головною є некерована генерація, що негативно впливає на стабільність частоти в

електромережі. Наявність суттєвих добових та сезонних коливань у виробітку СЕС та ВЕС ускладнює балансування енергосистеми, особливо в умовах обмежених можливостей традиційної генерації для покриття пікових або аварійних навантажень. З цієї причини виникла потреба у високодинамічних елементах регулювання, зокрема в системах зберігання енергії (СЗЕ).

Впровадження СЗЕ дозволяє акумулювати надлишки виробленої електроенергії в години її профіциту та віддавати її в мережу в моменти дефіциту, забезпечуючи таким чином як регулювання частоти, так і зменшення небалансів. У випадку, коли такі СЗЕ належать ОСП (оператору системи передачі) чи ОСП (оператору системи розподілу), економічна ефективність не є критичним критерієм — на перший план виходять технічні параметри стабілізації режимів, а прийняття рішень про місце встановлення та обсяг накопичення ґрунтується на аналізі впливу на загальний стан енергосистеми.

Проте зовсім інша ситуація для приватного інвестора, де головним є економічний зиск. У цьому випадку доцільність встановлення СЗЕ оцінюється через призму терміну окупності, внутрішньої норми прибутку (IRR), чистої приведеної вартості (NPV, а також операційних ризиків. Будь-які додаткові капітальні витрати — зокрема, на придбання УЗЕ, їхнє проектування, монтаж, інтеграцію в інфраструктуру СЕС чи ВЕС, а також витрати на обслуговування — призводять до збільшення загального кошторису проєкту. Це безпосередньо впливає на подовження терміну повернення інвестицій, що знижує привабливість проєкту в умовах високої волатильності ринку та невизначеності подальшої підтримки «зелених» стимулів.

Таким чином, проблема економічного обґрунтування впровадження СЗЕ у приватних проєктах полягає в необхідності знаходження компромісу між регуляторними вимогами та технічними потребами енергосистеми, з одного боку, і прагненням до фінансової ефективності — з іншого. Для

досягнення цього компромісу потрібні або додаткові фінансові стимули з боку держави (наприклад, субсидії, податкові пільги, ринкові механізми оплати послуг з балансування), або створення нових сегментів ринку (наприклад, ринку гнучких потужностей чи вторинного резерву), де власники СЗЕ могли б монетизувати свої послуги. Лише за цих умов інвестиції в накопичувачі електроенергії зможуть стати привабливими для приватного бізнесу.

4 ОХОРОНА ПРАЦІ

У цьому розділі бакалаврської роботи запропоновані заходи та засоби з охорони праці електротехнічного персоналу з виконання досліджень накопичувачів електроенергії. В процесі виконання цих робіт на персонал впливають такі шкідливі виробничі фактори [1, 2]:

1) фізичні: підвищена запиленість повітря робочої зони; підвищена та знижена температура повітря робочої зони; підвищена та знижена рухомість повітря; підвищена та знижена вологість повітря; підвищений рівень шуму на робочому місці; підвищений рівень інфразвукових коливань; підвищений рівень ультразвуку; небезпечне значення напруги в електричному колі, замикання якого може відбутись через тіло людини; підвищений рівень статичної електрики; нестача природного освітлення; недостатнє освітлення робочої зони; підвищена яскравість світла; знижена контрастність; прямий і відбитий блиск; підвищена пульсація світлового потоку;

2) психофізіологічні: фізичні перевантаження (статичні); нервово-психічні перенавантаження (розумові перенапруги, монотонність праці, перенапруга аналізаторів).

4.1 Технічні рішення з безпечної експлуатації обладнання

4.1.1 Технічні рішення з безпечної організації робочих місць

Конструкція робочого місця повинна відповідати сучасним вимогам ергономіки та Гігієнічної класифікації праці за показниками шкідливості та небезпечності факторів виробничого середовища, важкості та напруженості трудового процесу, затвердженої Наказом Міністерства охорони здоров'я № 528 від 27 грудня 2001 року [1], характеру виконуваної роботи та забезпечити оптимальне розміщення на робочій поверхні документів, рухомого пюпітра (тримача документів) та обладнання ПК (монітора, системного блоку, клавіатури, пристрою «миша», принтера та інших периферійних пристроїв з урахуванням їх кількості та конструктивних

особливостей). Площа одного обладнаного ПК робочого місця повинна складати не менше 6 м², а об'єм – не менше 20 м³.

Живлення силового обладнання проєктної організації та системи освітлення здійснюється від чотирьохпровідної трифазної мережі 380 х 220В (фазна напруга (фаза – "0") – 220В, а міжфазна лінійна (фаза – фаза) – 380В). Категорія умов по небезпеці електротравматизму – без підвищеної небезпеки.

Розташування монітора ПК має забезпечувати: безпечність роботи в цілому; зручність та ефективність зорової роботи з екраном в вертикальній площині під кутом $\pm 30^0$ від лінії зору, площа екрана при цьому має бути перпендикулярною нормальній лінії зору користувача.

Нульовий захисний провід прокладається від стійки групового розподільчого щита, розподільчого пункту до розеток живлення. Не допускається підключення на щиті до одного контактного затискача нульового робочого та нульового захисного провідників. Площа перерізу нульового робочого та нульового захисного провідника в груповій трипровідній мережі повинна бути не менше площі перерізу фазового провідника. Усі провідники повинні відповідати номінальним параметрам мережі та навантаження, умовам навколишнього середовища, умовам розподілу провідників, температурному режиму та типам апаратури захисту, вимогам ПВЕ. У приміщені, де одночасно експлуатується або обслуговується більше п'яти персональних комп'ютерів, на помітному та доступному місці встановлюється аварійний резервний вимикач, який може повністю вимкнути електричне живлення приміщення, крім освітлення.

Комп'ютери та устаткування для їх обслуговування, ремонту та налагодження повинні підключатися до електромережі тільки з допомогою справних штепсельних з'єднань і електророзеток заводського виготовлення. Штепсельні з'єднання та електророзетки крім контактів фазового та нульового робочого провідників повинні мати спеціальні контакти для підключення нульового захисного провідника. Конструкція їх має бути

такою, щоб приєднання нульового захисного провідника відбувалося раніше ніж приєднання фазового та нульового робочого провідників. Порядок роз'єднання при відключенні має бути зворотним. Необхідно унеможливити з'єднання контактів фазових провідників з контактами нульового захисного провідника.

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

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

нульового захисного провідників. Нульовий захисний провідник використовується для заземлення (занулення) електроприймачів. Використання нульового робочого провідника як нульового захисного провідника забороняється.

Є неприпустимими: експлуатація кабелів та проводів з пошкодженою або такою, що втратила захисні властивості за час експлуатації, ізоляцією; залишення під напругою кабелів та проводів з неізольованими провідниками; застосування саморобних подовжувачів, які не відповідають вимогам до переносних електропроводок; застосування для опалення приміщення нестандартного (саморобного) електронагрівального обладнання або ламп розжарювання; користування пошкодженими розетками, розгалужувальними та з'єднувальними коробками, вимикачами та іншими електровиробами, а також лампами, скло яких має сліди затемнення або випинання; підвішування світильників безпосередньо на струмопровідних проводах, обгортання електроламп і світильників папером, тканиною та іншими горючими матеріалами, експлуатація їх зі знятими ковпаками (розсіювачами); використання електроапаратури та приладів в умовах, що не відповідають вказівкам (рекомендаціям) підприємств-виготовлювачів.

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

4.1.2 Електробезпека

Технічні рішення щодо запобігання електротравмам [3, 4]:

1) Для запобігання електротравм від контакту з нормально-струмопровідними елементами електроустаткування, необхідно: розміщувати неізольовані струмопровідні елементи в окремих приміщеннях з обмеженим доступом, у металевих шафах; використовувати засоби орієнтації в електроустаткуванні - написи, таблички, попереджувальні знаки; підвід кабелів до споживачів здійснювати у закритих конструкціях підлоги;

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

3) Електрозахисні засоби захисту

Персонал, який обслуговує електроустановки, повинен бути забезпечений випробуваними засобами захисту. Перед застосуванням засобів захисту персонал зобов'язаний перевірити їх справність, відсутність зовнішніх пошкоджень, очистити і протерти від пилу, перевірити за штампом дату наступної перевірки. Користуватися засобами захисту, термін придатності яких вийшов, забороняється.

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

До них відносяться (до 1000 В): діелектричні калоші; діелектричні килимки; переносні заземлення; ізолювальні накладки і підставки; захисні пристрої; плакати і знаки безпеки.

4.2 Технічні рішення з гігієни праці і виробничої санітарії

4.2.1 Мікроклімат

Мікроклімат приміщення – це сукупність фізичних параметрів повітря в виробничому приміщенні, які діють на людину в процесі праці на її робочому місці, в робочій зоні. При цьому потрібно розрізняти оптимальні та допустимі мікрокліматичні умови.

Нормуються параметри мікроклімату в виробничих приміщеннях та гранично допустимі концентрації шкідливих речовин в повітрі робочої зони [6]. Тяжкість роботи розділяється на категорії залежно від загальних енерговитрат організму, ккал/с (Вт). Параметри мікроклімату в виробничому приміщенні для виконання проєктних робіт наведено в таблиці 1.

Таблиця 1 – Нормування параметрів мікроклімату для постійних робочих місць

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

Для забезпечення необхідних за нормативами параметрів мікроклімату [7] на робочому місці інженера передбачається: в холодну пору року використання калорифера; в літню пору застосування вентиляторів обдува; провітрювання приміщення.

4.2.2 Склад повітря робочої зони

Забруднення повітря робочої зони регламентується концентраціями (ГДК) в мг/м [6]. В умовах роботи на граничнодопустимих концентраціях можливими забруднювачами повітря робочої зони можуть бути пил та шкідливі гази, їх ГДК наведено в таблиці 2.

Таблиця 2 – Гранично допустимі концентрації шкідливих речовин у повітрі робочої зони оператора лінії

Назва речовини	ГДК, мг/м ³		Клас небезпечності
	Максимально разова	Середньо добова	
Пил нетоксичний	0.5	0.15	4

Для забезпечення складу повітря робочої зони передбачено [7]: провітрювання приміщення; цілісність вікон для перешкоджання попадання пилу в приміщення під час роботи; встановлення пиловловлюючих засобів.

4.2.3 Виробниче освітлення

Характеристика зорових робіт – середньої точності [8].

Відповідно до ДБН В.2.5-28-2018 розряд зорової роботи IV, підрозряд «в».

Для забезпечення достатнього освітлення здійснюють систематичне очищення скла та світильників від пилу (не рідше двох разів на рік), використовують жалюзі. В разі нестачі природного освітлення, використовують загальне штучне освітленням, що створюється за допомогою світлодіодних ламп E27 LED 15W NW A60 "SG". Висота підвісу світильників над робочою поверхнею 4,5 метра.

Таблиця 3 – Вимоги до освітлення приміщень виробничих підприємств

Х-ка зорової роботи	Найменший або еквівалентний розмір	Розряд зорової роботи	Під-розряд зорової роботи	Контраст об'єкта з фоном	Х-ка фону	Штучне при системі комбінованого освітлення	Природне Ен пр	Сумісне Е сум
---------------------	------------------------------------	-----------------------	---------------------------	--------------------------	-----------	---	----------------	---------------

	об'єкта розрізнення, мм					всього	у т. ч. від загального		
Середньої точності	Від 0,5 до 1,0 включно	IV	в	середній	середній	400	200	4	2,4

Для загального освітлення приміщень рекомендується використовувати головним чином, світлодіодні лампи, що обумовлюється наступними перевагами: високою світловою віддачею (до 75 лм/Вт і більше); довгим часом використання (до 10000 годин); малою яскравістю поверхні, що світиться; спектральним складом випромінюючого світла (для деяких видів ламп цей склад є близьким до природного світла, що забезпечує гарну передачу кольорів). Разом з тим необхідно врахувати і недоліки цих ламп: висока пульсація світлого потоку та пов'язана з цим можливість стробоскопічного ефекту; для запалювання та горіння лампи необхідно включення послідовно з ним пускорегулюючих апаратів; працездатність ламп залежить від температури оточуючого середовища, до кінця часу роботи світловий потік зменшується більш ніж на половину від номінального.

Світильники з світлодіодними лампами розміщують рядами; що дозволяє здійснювати їх послідовне включення (відключення) в залежності від величини природної освітленості. При експлуатації здійснюється контроль за рівнем напруги освітлювальної мережі, своєчасна заміна перегорілих ламп, забезпечується чистота повітря у приміщенні.

4.2.4 Виробничий шум

Для відносної логарифмічної шкали в якості нульових рівнів обрані показники, що характеризують мінімальний поріг сприйняття звуку людським вухом на частоті 1000 Гц. Нормативним документом, який регламентує рівні шуму для різних категорій робочих місць службових приміщень, є «ССБТ. Шум. Загальні вимоги безпеки» [9] (таблиця 4).

Шум порушує нормальну роботу шлунку, особливо впливає на

центральну нервову систему. Для забезпечення допустимих параметрів шуму в приміщенні, проектом передбачено засоби колективного захисту: акустичні, архітектурно-планувальні й організаційно-технічні.

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

Таблиця 4 – Рівень звукового тиску

Характер робіт	Допустимі рівні звукового тиску (дБ) в стандартизованих октавних смугах з середньгеометричними частотами, Гц								
	32	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
Творча діяльність, конструювання і проєктування, програмування	86	71	61	54	49	45	42	40	38

Для зниження шуму в приміщенні потрібно: безпосередньо біля джерел шуму використовувати звукопоглинаючі матеріали для покриття стелі, стін, застосовувати підвісні звукопоглиначі; для боротьби з вентиляційним шумом потрібно застосовувати мало шумові вентилятори.

4.3. Пожежна безпека

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

Приміщення п/ст за вибухонебезпечною та пожежонебезпечною відноситься до категорії Д – речовини і/або матеріали, що зазначені вище для

категорій приміщень В (крім горючих газів, горючих пилу і/або волокон), а також негорючі речовини і/або матеріали в холодному стані (за температури навколишнього середовища), за умов, що приміщення, в яких знаходяться (зберігаються, переробляються, транспортуються) зазначені вище речовини і/або матеріали, не відносяться до категорій А, Б або В, з зонами П-III (місця, де зберігаються тверді горючі речовини). Будівля, в якій розташовані ці приміщення, характеризується III ступенем вогнестійкості.

До III ступеня вогнестійкості відносяться будинки з несучими та огорожувальними конструкціями з природних або штучних кам'яних матеріалів, бетону, залізобетону. Для перекриттів дозволяється застосовувати дерев'яні конструкції, захищені штукатуркою або негорючими листовими, плитними матеріалами, або матеріалами груп горючості Г1 (низької горючості), Г2 (помірної горючості). До елементів покриттів не висуваються вимоги щодо межі вогнестійкості, поширення вогню, при цьому елементи горищного покриття з деревини повинні мати вогнезахисну обробку. Мінімальні межі вогнестійкості будівельних конструкцій (у хвиликах) та максимальні межі поширення вогню по них (см) за ДБН В.1.1.7-2016 [15] наведено в таблиці 4.6.

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

Ступінь вогнестійкості і будинків	Мінімальні межі вогнестійкості будівельних конструкцій (у хвиликах) і максимальні межі поширення вогню по них (см)								
	стіни				коло-ни	сходові площадки, костури, сходи, балки, марші сходових кліток	пере-криття між поверхів (у т.ч. горищні та над підвалами)	елементи суміщених покриттів	
	несучі та сходових кліток	само-несучі	зовнішні не-несучі	внутрішні не-несучі (перегородки)				плити, насти-ли, прого-ни	балки, ферми, арки, рами
III	REI 120 M0	REI 60 M0	E 15 M0	E1 15 M1	R 120 M0	R 60 M0	REI 45 M1	Не нормуються	

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

Таблиця 4.7 – Протипожежні перешкоди та мінімальні межі їх вогнестійкості

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

Протипожежні відстані від житлових, громадських, адміністративно-побутових будинків промислових підприємств, гаражів до виробничих, складських будинків і споруд слід приймати за таблицею 4.8 (знаменник).

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

Ступінь вогнестійкості будинка	Відстані при ступені вогнестійкості будинків, м		
	I, II	III	IV, V
III	8/9	8/12	10/15

На території п/ст встановлено 18 вогнегасників ВП-5 та ВВП-5 [16] і протипожежний стенд.

ВИСНОВКИ

У бакалаврській кваліфікаційній роботі проведено комплексне дослідження впливу відновлюваних джерел енергії (ВДЕ) на технічні параметри електроенергетичної системи, зокрема на частотні характеристики та режими її функціонування. Особливу увагу приділено регламентованим межам частоти як одному з основоположних параметрів надійності та стабільності роботи енергосистеми. Досліджено механізми її регулювання в умовах широкого залучення джерел із змінною генерацією, насамперед сонячних електростанцій (СЕС).

У роботі проаналізовано чинники, що сприяли сталому зростанню обсягів встановлених потужностей ВДЕ, а також запропоновано перспективні напрямки їх подальшого розвитку з урахуванням сучасних технічних викликів. Окрему увагу приділено інтеграції систем зберігання енергії (СЗЕ) як одного з ключових елементів, що здатен компенсувати недоліки генерації від ВДЕ. Наведено класифікацію СЗЕ за фізичним принципом роботи — механічні, теплові, хімічні, електричні та електрохімічні. Із-поміж усіх типів систем особливо відзначено гідроакumuлюючі електростанції (ГАЕС) як найбільш потужні за встановленою потужністю, що традиційно використовуються для регулювання частоти.

Разом із тим, сучасний тренд розвитку немеханічних накопичувачів енергії демонструє зростання ролі електрохімічних рішень, зокрема літій-іонних акумуляторів, які характеризуються високим ККД, енергетичною щільністю, порівняно низькою вартістю і гнучкістю в управлінні. У рамках практичної частини роботи обґрунтовано вибір системи зберігання енергії на основі літій-залізо-фосфатних акумуляторів виробництва компанії Huawei Technologies. Розглянуто технічні параметри їхньої реалізації, включаючи систему управління, модульність конструкції, ефективну

систему охолодження, пожежну безпеку, адаптивність до промислових умов експлуатації.

Для забезпечення підключення системи накопичення енергії до енергомережі передбачено встановлення комплектної трансформаторної підстанції (КТП) із вибором відповідного обладнання, що забезпечить необхідний рівень трансформації та захисту.

Однією з ключових проблем реалізації подібних проєктів визначено економічну доцільність впровадження накопичувачів. В умовах ринкової моделі електроенергетики України пропонується запровадження спеціального тарифу або додаткової послуги на балансуєчому ринку, що передбачатиме компенсацію витрат виробникам ВДЕ за надання послуг з регулювання небалансів. Такий підхід дозволяє уникнути або значно зменшити збільшення терміну окупності проєктів з установаження СЗЕ, роблячи їх більш привабливими для інвесторів.

Таким чином, інтеграція накопичувачів електроенергії не лише дозволяє суттєво підвищити якість та надійність енергопостачання в умовах значного проникнення ВДЕ, а й слугує важливим економічним інструментом для розвитку енергетичної галузі загалом. Формування додаткових ринкових механізмів стимулювання — зокрема через впровадження спеціальних тарифів — створює додаткові умови для розширення відновлюваної генерації, зміцнення енергетичної безпеки та підвищення конкурентоспроможності економіки України.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. О.С. Яндульський , А.Б. Нестерко, О.В. Тимохін, Г.О. Труніна Регулювання частоти та потужності електроенергетичних систем з відновлюваними джерелами енергії Монографія - Київ.: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2017.- 200 с.
2. Вимоги до регулювання частоти і потужності в ОЕС України: СОУ-Н ЕЕ ЯЕК 04.156:2009. Чинний від 2009-05-23. - Київ: Мінпаливенерго, 2009. – 54 с.
3. Правила улаштування електроустановок. - Видання офіційне. Міненерговугілля України. - Х. : Видпнмицтво «Форт», 2017. - 760 с.
4. Енергетична стратегія України на період до 2035 року «Безпека, енергоефективність, конкурентоспроможність». Схвалено розпорядженням Кабінету Міністрів України від 18.08.2017 р. № 605-р. Режим доступу: <http://zakon.rada.gov.ua/laws/show/605-2017-%D1%80>.
5. С. О. Кудря В. І. Будько Вступ до спеціальності. Нетрадиційні та відновлювані джерела енергії Курс лекцій – Київ.: НТУУ КПІ, 2013. – 387 с.
6. Л. Н. Добровольська, В. В. Кулик, П. Д. Лежнюк Електроощадні технології в електричних мережах енергосистем Навчальний посібник - Луцьк ІВВ Луцького НТУ, 2018. – 328 с.
7. О. Гуменюк І. Куроєдова Р. Гаврилюк Розвиток відновлюваної енергетики та створення балансуючих потужностей – аналіз викликів для стійкості енергосистеми України в розрізі досягнення енергетичних та кліматичних цілей Дослідження Київ СУАЕ, НЕЦУ – 30 с.
8. М. П. Кузнєцов О. А. Мельник Комплексне використання відновлюваних джерел енергії Курс лекцій – Київ КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022. – 304 с.
9. О. М. Суходоля Новітні енергетичні технології та їх вплив на функціонування систем енергопостачання Аналітична доповідь Київ :

НІСД, 2022. – 36 с. – https://niss.gov.ua/sites/default/files/2022-12/ad_new-energy-technologies_gotove.pdf.

10. І.В. Блінов, Є.В. Парус Оптовий та роздрібний ринок електричної енергії Навчальний посібник - Київ КПІ ім. Ігоря Сікорського 2023 Інститут електродинаміки НАН України, 2023 – 291 с.

11. І.В. Блінов Є.В. Парус Оцінка економічного ефекту від надання системами накопичення електричної енергії послуги балансування в ОЕС України <file:///C:/Users/user/Downloads/Telegram%20Desktop/28-37---i..pdf> Інститут електродинаміки НАН України, 2023-10 с.

12. ДСНіП «Гігієнічна класифікація праці за показниками шкідливості та небезпечності факторів виробничого середовища, важкості та напруженості трудового процесу». Наказ МОЗ № 248 від 08.04.2014.

13. ДНАОП 1.1.10-1.01-97 Правила безпечної експлуатації електроустановок. URL: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page?id_doc=21826.

14. ДСТУ Б В.2.5-82:2016. Електробезпека в будівлях і спорудах. Вимоги до захисних заходів від ураження електричним струмом. К. : ДП «УкрНДНЦ», 2016. 109 с.

15. НПАОП 40.1-1.32-01 (ДНАОП 0.00-1.32-01) Правила будови електроустановок. Електрообладнання спеціальних установок. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/rada/show/v0272203-01#Text>.

16. ДСН 3.3.6.042-99 Санітарні норми мікроклімату виробничих приміщень. URL: <http://mozdocs.kiev.ua/view.php?id=1972>.

17. ДБН В.2.5-67:2013. Опалення, вентиляція та кондиціонування. К. : Мінрегіонбуд України, 2013. 149 с.

18. ДБН В.2.5-28:2018 Природне і штучне освітлення. URL: http://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=79885

19. ДСН 3.3.6.037-99 Санітарні норми виробничого шуму, ультразвуку та інфразвуку. URL: <http://document.ua/sanitarni-normi-virobnichogo-shumu-ultrazvuku-ta-infrazvuku-nor4878.html>.

20. ДСН 3.3.6.039-99. Державні санітарні норми виробничої загальної та локальної вібрації. URL: <http://zakon2.rada.gov.ua/rada/show/va039282-99>.
21. НАПБ А.01.001-14. Правила пожежної безпеки в Україні. К. : МВС України, 2014. 47 с.
22. ДСТУ 8828:2019 Пожежна безпека. Загальні положення. URL: <https://dwg.ru/dnl/15125>.
23. ДСТУ 8829:2019 Пожежовибухонебезпечність речовин і матеріалів. Номенклатура показників і методи їхнього визначення. Класифікація. URL: <https://www.alutal.com.ua/wp-content/uploads/2021/02/dstu-8829-2019-1.pdf>.
24. ДСТУ Б В.1.1-36:2016 Визначення категорій приміщень, будинків та зовнішніх установок за вибухопожежною та пожежною небезпек. URL: https://dbn.co.ua/load/normativy/dstu/dstu_b_v_1_1_36/5-1-0-1759.
25. ДБН В.1.1-7:2016 Пожежна безпека об'єктів будівництва. Загальні вимоги. URL: http://www.poliplast.ua/doc/dbn_v.1.1-7-2002.pdf.
26. Наказ Міністерства внутрішніх справ України «Про затвердження Правил експлуатації та типових норм належності вогнегасників». URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0225-18#Text>.

ДОДАТОК А

ПРОТОКОЛ ПЕРЕВІРКИ НАВЧАЛЬНОЇ (КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ) РОБОТИ

Назва роботи: «Дослідження накопичувачів електроенергії як засобу балансування графіків навантаження»

Тип роботи: Бакалаврська кваліфікаційна робота

(кваліфікаційна робота, курсовий проект (робота), реферат, аналітичний огляд, інше (вказати))

Підрозділ: Кафедра електричних станцій та систем

(кафедра, факультет (інститут), навчальна група)

Керівник: к.т.н., доцент кафедри ЕСС Вишневський С.Я.

(прізвище, ініціали, посада)

Показники звіту подібності

StrikePlagiarism	
Оригінальність	99%
Загальна схожість	1%

Аналіз звіту подібності (відмітити потрібне)

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

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

Автор

(підпис)

Бордюг Ю.О.

(прізвище, ініціали)

Опис прийнятого рішення

Робота допущена до захисту

Особа, відповідальна за перевірку

(підпис)

Вишневський С.Я

(прізвище, ініціали)

Експерт

(за потреби)

(підпис)

(прізвище, ініціали, посада)

(підпис)

(прізвище, ініціали)

ДОДАТОК Б

БАКАЛАВРСЬКА КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

ДОСЛІДЖЕННЯ НАКОПИЧУВАЧІВ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ ЯК ЗАСОБУ БАЛАНСУВАННЯ ГРАФІКІВ НАВАНТАЖЕННЯ

Виконав: ст. гр. ЕС-216. Бордюг Ю.О.

Науковий керівник: к.т.н., доц., доцент каф. ЕСС Вишневський С. Я.

Актуальність роботи. Стратегія розвитку енергетики України передбачає значне збільшення встановленої потужності енергоустановок ВДЕ в сукупності із іншими елементами енергосистеми, така тенденція відбувається і в інших країнах. Робота енергоустановок ВДЕ пов'язана із процесами прогнозування вироблення електроенергії. Вирішенням цієї проблеми – може бути застосування систем зберігання енергії, що братимуть участь в регулюванні потужності, і забезпечувати необхідні значення параметрів енергосистеми.

Порушення балансу активної потужності приводить до зміни частоти, що є одним із найважливіших параметрів стану енергосистеми, забезпечення якого визначає ефективність і надійність роботи енергосистеми. Регулювання частоти в електричній мережі реалізується шляхом регулювання обсягів генерування та споживання активної потужності.

Мета і задачі дослідження: дослідження відновлювальної енергетики, її вплив на енергосистему, дослідження способів балансування потужності за допомогою систем зберігання енергії, технічно-економічне обґрунтування використання систем зберігання енергії.

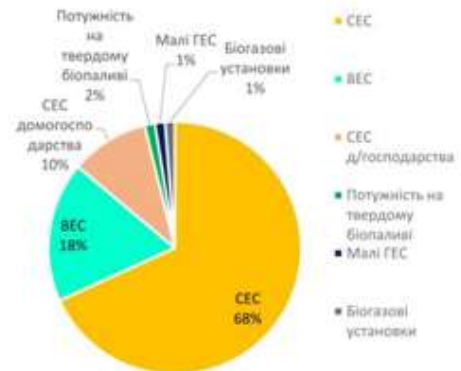
Регулювання частоти в електроенергетичній системі здійснюють за допомогою електростанцій, що балансуються по частоті. Пікові навантаження графіка електричного навантаження покривають ГЕС, ГАЕС, ГТУ.

Також для балансування графіків навантаження можуть бути використані засоби накопичення енергії (ЗНЕ)



Протягом останніх довоєнних років було введено в ОЕС нових генеруючих потужностей ВДЕ вдвічі більше ніж за попередній період

Електрична енергія, що генерується джерелами електроенергії СЕС та ВЕС носить імовірнісний характер, що вимагає збільшення регулюючих потужностей



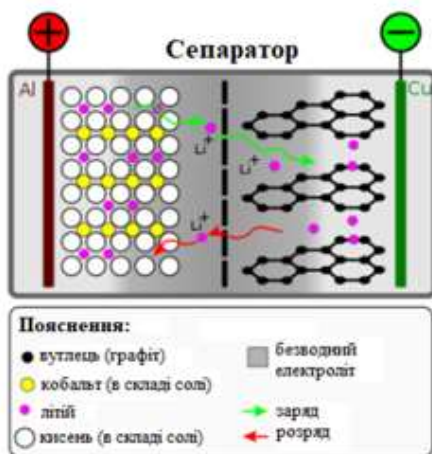
За оцінкою EASE (European Association for Storage of Energy) системи зберігання поділяються наступним чином: механічні, теплові, хімічні, електрохімічні, електричні.



ГАЕС в розрізі



Гравітаційний накопичувач електроенергії вагонеткового виконання



Літій-іонний акумулятор

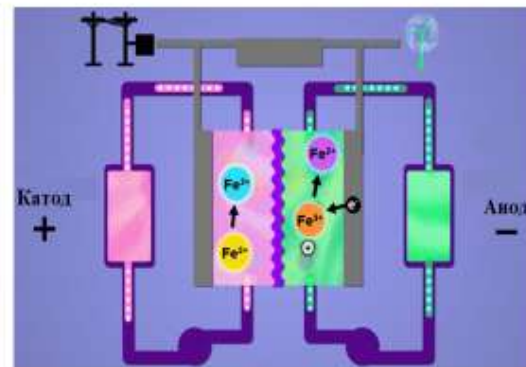
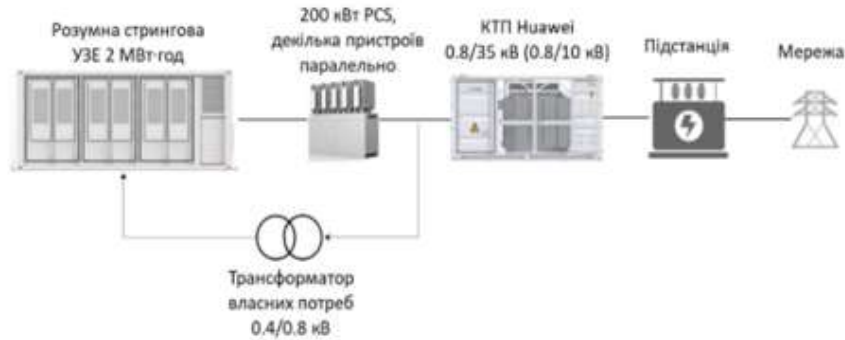
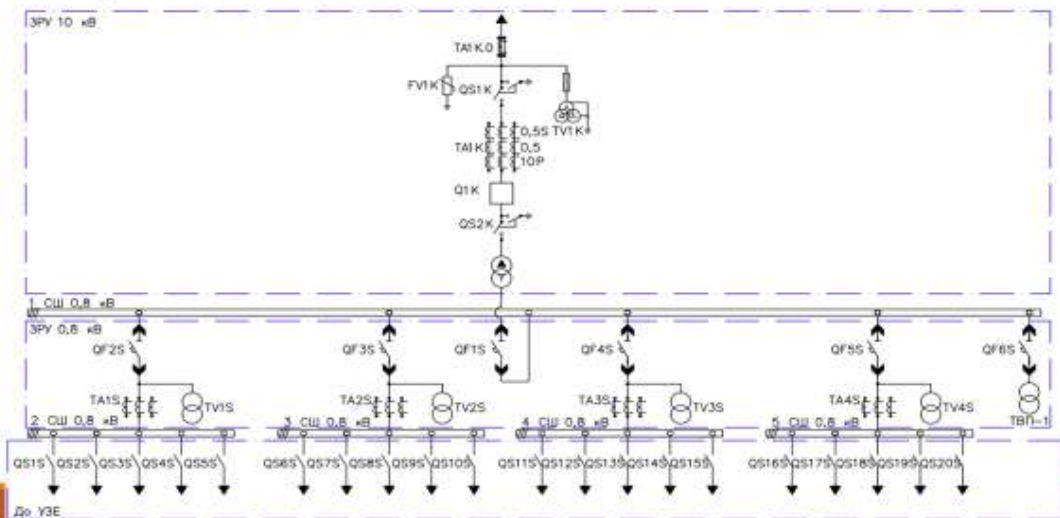


Схема проточної батареї

Системи зберігання енергії виробництва компанії Huawei Technologies складаються з: розумні стрингові УЗЕ, розподільчого щита постійного струму, системи інтелектуального перетворення енергії, розумного контролера, та підвищувачого трансформатора.



Для збору та передачі потужності УЗЕ на території об'єкту передбачено встановлення КТП-10/0,8-6300 кВА, нище наведена головна електрична схема



Висновки

В бакалаврській кваліфікаційній роботі було оцінено вплив ВДЕ на параметри енергосистеми, можливості регулювання небалансів. Було досліджено роботу різних систем зберігання енергії.

Запропоновано використання літій-іонних накопичувачів, що працюють в комплексі споруд зберігання енергії. Для зв'язку із енергосистемою рішеннями передбачено встановлення КТП.

Впровадження накопичувачів електроенергії може позитивно вплинути на стан ОЕС України в майбутньому, а розвиток і здешевлення технологій накопичення в комплексі із додатковим економічним стимулюванням зробити інвестування загалом у відновлювальну енергетику більш привабливим для потенційних інвесторів.

Доповідь на тему: «Дослідження накопичувачів електроенергії як засобу балансування графіків навантаження»

Шановні колеги!

Сьогодні в енергетичній галузі стрімко зростає роль відновлюваних джерел енергії — зокрема, сонячних та вітрових електростанцій. Однак їх використання супроводжується суттєвою проблемою — нерівномірністю генерації, яка безпосередньо залежить від погодних умов. Це створює виклики для підтримки балансу між виробництвом і споживанням електроенергії, особливо в моменти пікових навантажень або надлишку генерації. Рішенням цієї проблеми є застосування **систем накопичення електроенергії**, або СЗЕ, які здатні акумулювати надлишок електроенергії і віддавати її в мережу тоді, коли це найбільш необхідно.

В межах бакалаврської кваліфікаційної роботи було проаналізовано основні типи накопичувачів: механічні, теплові, хімічні, електротехнічні та електрохімічні. Найбільше практичне значення для сучасної енергосистеми мають **електрохімічні накопичувачі**, зокрема **літій-іонні батареї**. Вони вирізняються високим коефіцієнтом корисної дії, значною енергетичною щільністю та можливістю швидкого заряду і розряду. Завдяки цим характеристикам, літій-іонні системи можуть ефективно згладжувати добові та внутрішньогодинні коливання графіків навантаження, а також брати участь у регулюванні частоти в енергосистемі.

У роботі запропоновано застосування системи зберігання енергії **Huawei Technologies** потужністю 4 МВт на базі літій-залізо-фосфатних акумуляторів. Її технічна реалізація передбачає модульну конструкцію з високим рівнем безпеки, пожежогасіння, вентиляції та автоматичного керування. Такі системи можуть бути інтегровані до СЕС потужністю 10 МВт, забезпечуючи покриття небалансів генерації і підвищення якості електропостачання.

Отже, системи накопичення електроенергії — це не лише технологічне, а й стратегічне рішення для стабільної та гнучкої роботи енергосистеми в умовах зростаючої ролі відновлюваних джерел. Їх впровадження дозволяє зробити відновлювану енергетику надійною, ефективною і комерційно привабливою. Це крок до енергетичної незалежності та сталого розвитку.

Дякую за увагу.