

Вінницький національний технічний університет

Факультет електроенергетики та електромеханіки

Кафедра електричних станцій і систем

Бакалаврська кваліфікаційна робота на тему:

АНАЛІЗ ЕФЕКТИВНОСТІ ВИКОРИСТАННЯ СИСТЕМ НАКОПИЧЕННЯ ЕНЕРГІЇ
В МЕРЕЖАХ

Виконав: студент 4 курсу, групи ЕСМ-216
спеціальності 141 – «Електроенергетика,
електротехніка та електромеханіка»
за ОП «Електричні системи та мережі»,
Костенко Б. О. БК

Керівник: к.т.н., доц., доцент каф. ЕСС
Лесько В.О. ЛВ

« 06 » 06 2025 р.

Рецензент: _____
(наук.ступінь, вч.звання, назва кафедри)

« 04 » 06 2025 р. ЛВ

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

« 06 » ЛВ 2025 р.

Вінниця ВНТУ 2025 рік

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

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри ЕСС

д.т.н., професор Комар В. О.

«20» 03 2025 р.

З А В Д А Н Н Я **НА БАКАЛАВРСЬКУ КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ СТУДЕНТУ**

Костенку Богдану Олексійовичу .

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи. «Аналіз ефективності використання систем накопичення енергії в мережах»

Керівник роботи к.т.н., доцент каф. ЕСС Лесько В. О.

затверджена наказом вищого навчального закладу від 20.03.2025 року № 97

2. Термін подання студентом роботи 4 червня 2025 року

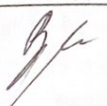
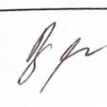
3. Вихідні дані до роботи: Перелік літературних джерел за тематикою роботи:

1. Правила улаштування електроустановок. – Видання офіційне. Міненерговугілля України. – Х. : Видавництво «Форт», 2017. – 760 с. 2. «ІТЕ 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. Кулик В. В. Типові рішення при проектуванні електричних мереж напругою 110-330 кВ: навчальний посібник / В. В. Кулик, В. В. Тептя, О. Б. Бурикін, О. В. Сікорська. Вінниця: ВНТУ, 2018. 110 с.

4. Зміст текстової частини: Вступ. 1. Загальна характеристика та огляд технічних засобів накопичення енергії та їх класифікація відповідно до сфери застосування. 2. Використання систем накопичення енергії для вирішення задач підвищення ефективності керування режимами розподільних систем. 3 Використання систем накопичення енергії при вирішенні задач регулювання напруги в розподільних мережах. 4. Охорона праці. Висновки. Список використаних джерел. Додатки.

5. Перелік ілюстративного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень) 1. характеристика та огляд технічних засобів накопичення енергії 2. систем накопичення енергії для вирішення задач підвищення ефективності керування режимами 3. Використання систем накопичення енергії при вирішенні задач регулювання напруги.

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	виконан прийня
Спеціальна частина	Керівник роботи Лесько В. О., к.т.н., доц., доцент кафедри ЕСС		
Охорона праці	Лесько В. О., к.т.н., доц., доцент кафедри ЕСС		

7. Дата видачі завдання 20 березня 2025 року

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва та зміст етапів	Термін виконання етапів роботи	
		початок	кінець
1	Формування та затвердження задач БКР	21.03.2025	24.03.2025
2	Вступ. Огляд літературних джерел	25.03.2025	30.03.2025
3	Загальна характеристика та огляд технічних засобів накопичення енергії та їх класифікація відповідно до сфери застосування (розділ 1 БКР)	31.03.2025	07.04.2025
4	Використання систем накопичення енергії для вирішення задач підвищення ефективності керування режимами розподільних систем (розділ 2 БКР)	08.04.2025	11.04.2025
5	Використання систем накопичення енергії при вирішенні задач регулювання напруги в розподільних мережах (розділ 3 БКР)	12.04.2025	19.04.2025
6	Виконання розділу охорона праці (розділ 4 БКР)	20.04.2025	30.04.2025
7	Формування висновків по роботі	01.05.2025	03.05.2025
8	Оформлення пояснювальної записки	04.05.2025	19.05.2025
9	Виконання графічної частини та оформлення презентації	20.05.2025	27.05.2025
10	Перевірка БКР на плагіат. Попередній захист БКР.	28.05.2025	3.06.2025
11	Рецензування БКР	04.06.2025	09.06.2025
12	Захист БКР	10.06.2025	12.06.2025

Студент


(підпис)

Б.О. Костенко

Керівник роботи


(підпис)

В. О. Лесько

АНОТАЦІЯ

Костенко Б.О. «Аналіз ефективності використання систем накопичення енергії в мережах». Бакалаврська робота. – Вінниця: ВНТУ, 2025. – 76 с. Рис. 10, табл.18, бібліогр. 60.

У роботі проведено аналіз сучасних систем накопичення енергії (СНЕ), їх класифікацію та характеристику з урахуванням сфер застосування. Розглянуто технології акумулювання, їх переваги та перспективи розвитку. Оцінено ефективність використання СНЕ для динамічного керування топологією та режимами розподільних електричних мереж, зокрема для регулювання напруги. Наведено приклади практичного впровадження СНЕ та заходи з охорони праці при їх експлуатації.

Ключові слова: системи накопичення енергії, СНЕ, розподільні мережі, керування режимами, регулювання напруги, енергетика.

ABSTRACT

Kostenko B.O. “Analysis of the effectiveness of using energy storage systems in networks”. Bachelor's thesis. – Vinnytsia: VNTU, 2025. – 76 p. Fig. 10, table 18, bibliography 60.

The paper analyzes modern energy storage systems (ESS), their classification and characteristics taking into account the areas of application. Accumulation technologies, their advantages and development prospects are considered. The effectiveness of using ESS for dynamic control of the topology and modes of distribution electrical networks, in particular for voltage regulation, is assessed. Examples of practical implementation of ESS and labor protection measures during their operation are given.

Keywords: energy storage systems, ESS, distribution networks, mode control, voltage regulation, energy.

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ

- АП - Акумуляуючий пристрій
- ВДЕ - Відновлювальні джерела енергії ГАЕС - Гідроакумуляуюча електростанція
- ОЕС - Об'єднана енергетична система України
- СНЕ - Система накопичення електроенергії
- САСП - Системи акумуляування на стисненому повітрі
- ESS - Energy storage system (система накопичення електроенергії)
- LFP - літій-залізо-фосфатні батареї
- NMC - Літій-нікель-марганець-кобальт-оксид
- LTO -Титанат літію
- LCO - Літій-кобальт-оксид Li-ion - Літій-іонні батареї
- SCADA - Система диспетчерського управління та збору даних
- DoD - Глибина розряду
- Pb-A - Свинцево-кислотні акумулятори
- Ni-Cd - Нікель-кадмієві батареї
- Na-S - Натрій сірчані батареї
- FES - Маховики або роторні накопичувачі енергії (Flywheel Energy Storage)

ЗМІСТ

1 Загальна характеристика та огляд технічних засобів накопичення енергії та їх класифікація відповідно до сфери застосування

1.1 Призначення систем накопичення енергії, технології та технічні характеристики

1.2 Загальна характеристика технологій акумулювання енергії

1.3 Сфери застосування СНЕ

1.4 Стан та перспективи розвитку технологій накопичення енергії

Висновки до розділу 1

2 Використання систем накопичення енергії для вирішення задач підвищення ефективності керування режимами розподільних систем

2.1 Обґрунтування доцільності використання систем накопичення енергії при вирішенні задач динамічного керування топологією розподільних мереж

3 Використання систем накопичення енергії при вирішенні задач регулювання напруги в розподільних мережах

3.1 Приклади використання систем накопичення енергії з метою підвищення ефективності керування режимами розподільних систем

Висновки до розділу 3

4. Охорона праці

ВИСНОВКИ

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

ВСТУП

Актуальність теми. У сучасних умовах розвитку енергетики використання систем накопичення електроенергії (СНЕ) набуває дедалі більшого значення як ефективного інструменту підвищення надійності та продуктивності функціонування розподільних мереж. Правильно підібрані за потужністю та обсягом накопичувачі енергії дозволяють згладжувати пікові навантаження, полегшують інтеграцію відновлюваних джерел енергії до енергосистеми та сприяють зниженню капітальних витрат на модернізацію мереж.

Зростає потреба у гнучких джерелах потужності для забезпечення стабільної роботи як всієї енергосистеми, так і окремих споживачів критичної інфраструктури. Застосування СНЕ відкриває можливість підтримки частотної стабільності та регулювання параметрів електропостачання. У зв'язку з цим виникає необхідність дослідити типи накопичувальних систем, можливості їх застосування у межах розподільних мереж та перспективи їхнього використання для оптимізації функціонування електроенергетичних об'єктів.

Мета і завдання дослідження. Метою даної бакалаврської кваліфікаційної роботи є аналіз сучасних та перспективних технологій накопичення електроенергії, оцінка їх техніко-економічних характеристик з метою обґрунтування доцільності впровадження у розподільних мережах.

Основні завдання:

Провести огляд існуючих технологій акумулювання електроенергії з урахуванням специфіки їх застосування в розподільних мережах;

Проаналізувати технічні та економічні параметри накопичувачів електроенергії та визначити найбільш ефективні сфери їх використання;

Розглянути можливості застосування СНЕ для регулювання напруги в системах розподілу електроенергії;

Провести розрахункові експерименти для оцінки ефективності накопичувальних систем у задачах реконфігурації розподільної мережі.

Об'єктом дослідження є процеси керування режимами роботи розподільних мереж із використанням локальних систем накопичення енергії.

Предмет дослідження – сучасні засоби накопичення електроенергії, їх технічні характеристики та методи раціонального застосування в електричних мережах.

Однією з головних проблем електроенергії як енергоносія є її обмежена можливість зберігання. У міру зростання обсягів генерації електроенергії та інтеграції децентралізованих джерел стає критично важливим створення ефективних рішень для акумулювання енергії. Системи накопичення дозволяють забезпечити розділення у часі між виробленням і споживанням енергії, накопичуючи надлишкову енергію в періоди низького попиту та віддаючи її в пікові години.

Впровадження таких систем у масштабах енергосистеми не лише підвищує її надійність, а й забезпечує вагомий економічний ефект. При цьому надзвичайно важливими є правильний вибір типу накопичувачів, їх параметрів, розміщення та режимів експлуатації.

1.ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА ТА ОГЛЯД ТЕХНІЧНИХ ЗАСОБІВ НАКОПИЧЕННЯ ЕНЕРГІЇ ТА ЇХ КЛАСИФІКАЦІЯ ВІДПОВІДНО ДО СФЕРИ ЗАСТОСУВАННЯ

1.1 Призначення систем накопичення енергії, технології та технічні характеристики

СНЕ (система накопичення енергії) - технологія, яка дозволяє зберігати енергію і вивільняти її на вимогу користувача. Системи накопичення енергії використовуються для підвищення надійності та ефективності електромереж шляхом згладжування коливань попиту та пропозиції енергії. Вони також можуть допомогти інтегрувати відновлювані джерела енергії, такі як вітрова та сонячна енергія, в електромережу, зберігаючи надлишок енергії, виробленої в періоди низького попиту, і вивільняючи її, коли попит є високим.

Системи зберігання енергії можуть також надавати інші переваги, окрім стабільності енергосистеми, такі як зменшення пікового попиту, покращення якості електроенергії та забезпечення резервного живлення під час відключень. Оскільки попит на відновлювану енергію та вимоги до стабільності енергосистеми продовжують зростати, очікується, що системи накопичення енергії відіграватимуть все більш важливу роль у майбутньому.

Сфери застосування засобів акумулювання енергії, а, відповідно, і ті позитивні ефекти які вони можуть дати, часто класифікують використовуючи такі, наприклад, характеристики як час розряду і обсяг накопичуваної енергії. Невеликі по ємності системи з коротким часом розряду можуть використовуватися для демпфірування стрибків (провалів) напруги й/або частоти переважно пов'язаних з перехідними процесами різної природи.

Системи з тривалим часом розряду можуть бути корисні споживачам з великим і нерівномірним електроспоживанням в плані перенесення певних обсягів електроспоживання з пікових годин з високою вартістю енергії на позапікові години, коли вартість електроенергії значно нижче. Коли мова йде про системи акумулювання «мегаватної» потужності, то тут вже питання може стояти про їх вихід безпосередньо на енергоринок, зокрема, ринок допоміжних

послуг як регулюючий резерв.

У масштабі енергосистем і систем розподілу електроенергії акумулювання може розглядатися як дієвий засіб в плані відстрочки інвестицій в їхній розвиток, реконструкцію або модернізацію. В електричних мережах системи акумулювання енергії можуть бути задіяні для регулювання напруги, управління потоками реактивної потужності, забезпечення надійності електропостачання, розвантаження окремих елементів, які потребують посилення або реконструкції, зокрема, за рахунок зниження пікових навантажень.

В системах зберігання енергії можуть використовуватися різні технології, які, наприклад, можуть групуватися згідно з класифікацією, наведеною в [1].

Говорячи про перспективи практичного застосування акумулювання енергії можна розглянути кілька варіантів вирішення задачі. Зокрема, мова повинна йти про визначення раціональних параметрів акумулюючого пристрою конкретним користувачем, виходячи з передбачуваної мети його застосування. При цьому зазвичай розглядаються переваги і експлуатаційні особливості різних технологій накопичення енергії (рисунки 1.1) [1]. Але навіть при такій найбільш загальній постановці завдання слід відповісти на деякі питання:

- яка область застосування акумулюючих пристроїв (АП) дає найбільший ефект для конкретного користувача;
- яким чином можна кількісно оцінити очікуваний ефект;
- яким чином слід диспетчеризувати роботу подібних пристроїв;
- як впливає точність прогнозування навантаження і генерації на обґрунтованість вибору АП і ефективність управління його роботою;
- як визначити оптимальні місця розміщення пристроїв акумулювання енергії в електричній мережі;
- якою має бути математична модель для можливості кількісної оцінки економічної ефективності застосування АП, орієнтованих на різні технології;
- яким чином обґрунтувати адекватні методи вибору оптимальних

параметрів і місць розміщення АП, в тому числі, з урахуванням декількох цільових функцій.

Технології акумулювання електричної енергії, в загальному випадку, включають в себе три функціональних блоки: перетворювальний блок, накопичувальний блок і блок, що включає комутаційне і захисне обладнання, компоненти управління та зв'язку для можливості спільної роботи з системою диспетчерського управління та збору даних (SCADA), що в сукупності може забезпечити виконання вимог щодо інтеграції пристроїв акумулювання (як розподіленого ресурсу) в електричній мережі. Так, наприклад, на рівні систем розподілу електричної енергії зазначені вимоги визначаються стандартами IEEE 1547 [2].

Для характеристики засобів акумулювання енергії, незалежно від використовуваної при цьому технології, застосовується ряд загальноприйнятих показників:

- енергетична ємність $A_{ак}$ - кількість збереженої енергії, яка може бути перетворена в електричну енергію;
- номінальна або розрядна потужність P_n - максимальна потужність, яка може накопичуватися АУ або видаватися їм в мережу;
- час розряду $t_p = \frac{A_{ак}}{P_n}$ - час, протягом якого АП може видавати в мережу номінальну потужність;
- загальна ефективність $\eta = \eta_{зар} \eta_{разр}$ - характеризує ефективність процесів заряду ($\eta_{зар}$) і розряду ($\eta_{разр}$) АП, тобто, по суті, враховує втрати енергії, які відбуваються при реалізації зазначених процесів;
- життєвий цикл, що характеризує максимальне число циклів заряду-розряду, на який розрахована система, або номінальний термін служби АП.

1.2 Загальна характеристика технологій акумулювання енергії

Акумулювання енергії не є абсолютно новим напрямком у глобальній енергетиці і, зокрема, в електроенергетиці. По суті, з самого початку

формування великих енергетичних об'єднань, ГАЕС розглядалися як ефективний засіб балансування генерації та споживання, оптимізації режимів роботи як традиційних джерел генерації, так і систем передачі та розподілу електричної енергії.

Наприклад, сьогодні в Європі на частку ГАЕС припадає більше 97% всього існуючого в електроенергетиці потенціалу акумулювання енергії. [3] За іншими джерелами (зокрема, [4]) в загальносвітовому масштабі гідроакумулювання становить близько 93% всіх встановлених і працюючих в електроенергетиці пристроїв акумулювання енергії.

Протягом багатьох років інші технології накопичення енергії не вважалося пріоритетом для енергетичної галузі, частково через те, що ці технології ще не були економічно обґрунтованими, а частково через те, що переваги зберігання енергії менше цінувалися в централізованій енергетичній системі, де генерація здебільше забезпечувалась за рахунок викопного палива. Однак ця ситуація почала швидко змінюватися завдяки покращенню економічної ефективності технології накопичення енергії та зобов'язанням, прийнятим більшістю світових держав, щодо декарбонізації економіки, що призвело до значного збільшення частки ВДЕ у виробництві електроенергії.

Так, наприклад, у Європі в період між 1990 та 2019 роками виробництво енергії відновлюваними джерелами (без урахування гідроенергетики) виросло з 20 TWh до 500 TWh, в основному за рахунок вітрової та сонячної генерації (рис. 1.1).

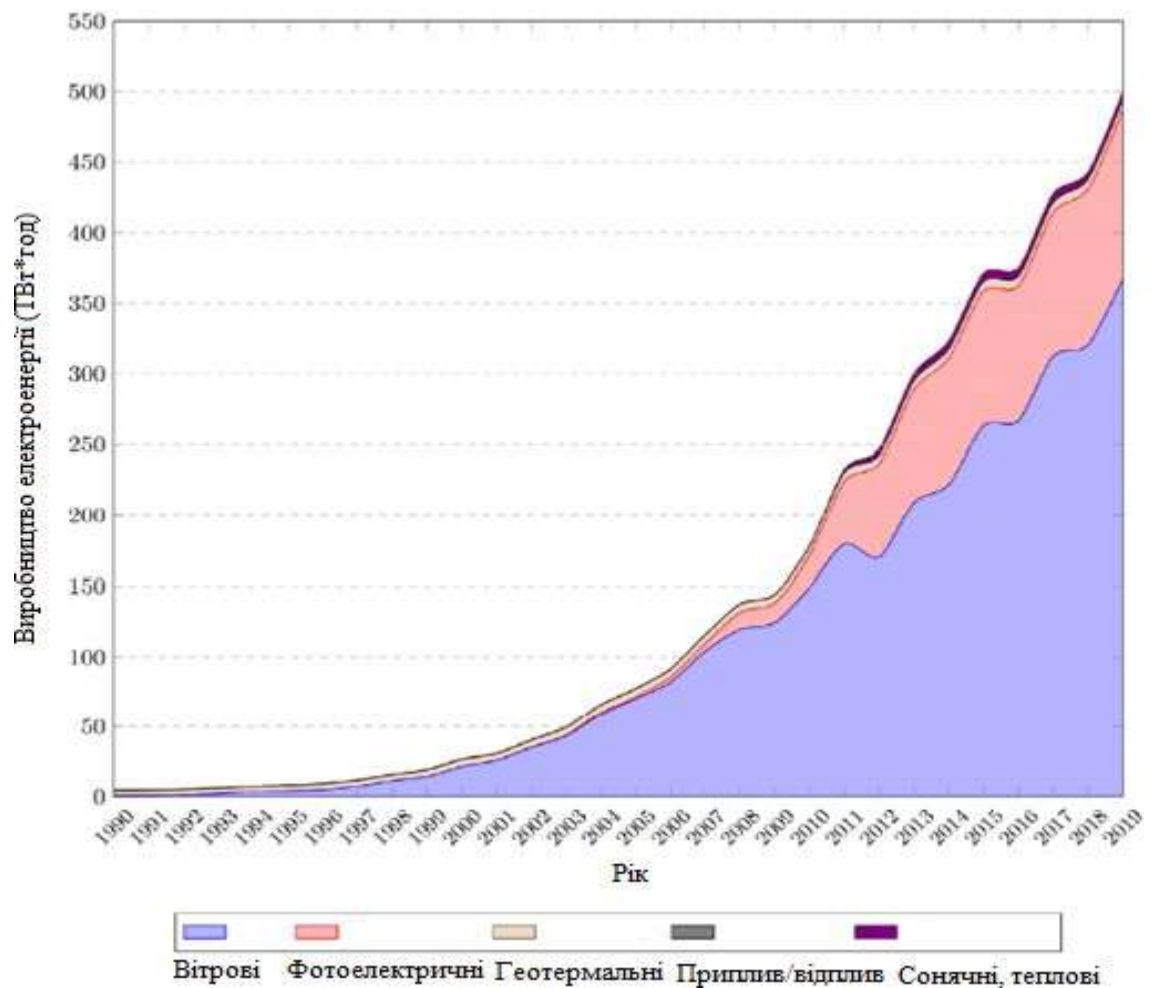


Рисунок 1.1 - Зміна виробництва електричної енергії в Європі відновлюваними джерелами без урахування гідроенергетики [5]

У цих умовах стає очевидним, що для забезпечення успішної інтеграції відновлюваних джерел енергії з неконтрольованою вихідною потужністю, необхідно синхронне впровадження і пристроїв акумулювання енергії або, принаймні, інших засобів, що забезпечують необхідну гнучкість для дотримання балансу між генерацією і споживанням [6]. Однак у будь-якому випадку системи накопичення енергії відіграватимуть виключно важливу роль при реалізації глобальної програми створення більш сприятливою по відношенню до навколишнього середовища та більш стійкої енергетики, забезпечуючи належний рівень безпеки, гнучкості та надійності функціонування всіх її секторів у процесі електропостачання ширшого кола різноманітних споживачів.

Загальноприйнято виділяти чотири групи технологій акумулювання енергії (за винятком теплової), які знаходять або можуть у перспективі знайти

застосування в електроенергетиці (рис. 1.2).

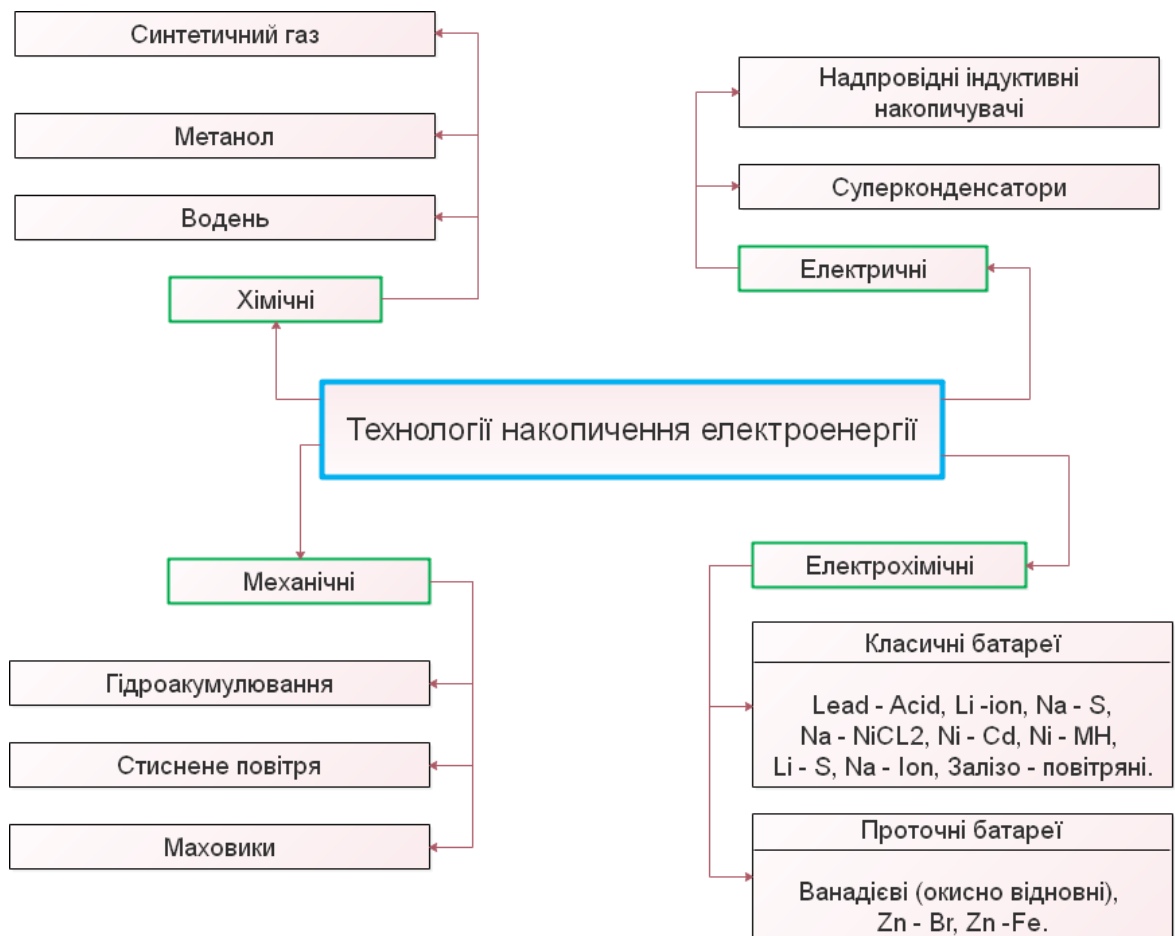


Рисунок 1.2 - Основні групи технологій акумулювання енергії,
орієнтованих на електроенергетичний сектор

Механічні системи зберігають енергію як потенційну ГАЕС та системи акумулювання на стисненому повітрі (САСП), а також як кінетичну енергію обертання в маховиках. Серед механічних систем накопичення енергії ГАЕС є домінуючою та найбільш широко впровадженою на даний момент формою зберігання енергії у світі у порівнянні з усіма іншими технологіями. Вони являють собою зрілі технології з довгою тривалістю розряду, високою ефективністю, великим терміном служби, відносно низькими питомими капітальними витратами, високонадійні, достатньо гнучкі, з низькими витратами на експлуатацію та обслуговування.

З іншого боку, оскільки система гідроакумулювання має повільний час відгуку, вона не підходить для компенсації мінливої потужності відновлюваних джерел енергії. Основними обмеженнями зазначених систем накопичення

енергії є їхня залежність від топографічних умов і великого землекористування, тривалий час розвитку і великий терміни окупності.

САСП також є достатньо поширеною в світі технологій зберігання енергії. Вони мають високу швидкодію, достатню тривалість розряду, низькі капітальні витрати та помірну ефективність. Основними обмеженнями впровадження зазначених систем є їх залежність від наявності відповідних геодезичних умов розташування.

Маховики мають низькі витрати на технічне обслуговування, відсутність викидів вуглецю і інших токсичних компонентів, довгий термін служби, дуже швидкий відгук, високу ефективність циклу (90–95%), дуже короткий час розряду та високу щільність потужності. Однак маховики страждають від втрат на холостому ході, коли знаходиться в режимі очікування. Це може привести до відносно високої швидкості саморозряду (до ~20% накопиченої ємності на годину). На додаток до цього маховики мають низьку ємність зберігання та високу вартість. Найпоширенішими сферами застосування маховиків є підвищення якості електроенергії в електричних мережах, забезпечуючи як регулювання частоти та напруги, так і безперебійність енергопостачання.

Електричні системи накопичення енергії складаються в основному з двох типів накопичувачів: суперконденсаторів і надпровідних магнітних (індуктивних) систем. Суперконденсатори мають тривалий термін служби, високу ефективність циклу, високу щільність потужності, дуже швидкий час відгуку, адаптованість до різноманітних середовищ і не залежить від глибини розряду (DoD), майже не потребують технічного обслуговування. Однак добова швидкість саморозряду суперконденсаторів достатньо висока, і вони потребують значних капітальних витрат. Крім того, суперконденсатори мають дуже коротку тривалість розряду й низьку щільність енергії і, таким чином, добре підходить тільки для додатків, які потребують короткострокового зберігання енергії.

Надпровідні магнітні системи мають високу швидкодію, дуже короткий час розряду, дуже високу ефективність. Однак на сьогодні зазначені системи

потребують дуже великих капітальних витрат, складної системи охолодження, мають високі добові показники саморозряду (10–15%) та негативний екологічний вплив сильного магнітного поля на навколишнє середовище. Завдяки швидкодії та короткій тривалості розряду, напівпровідні магнітні системи більше підходить для короткострокових застосувань, таких як проблеми з якістю електроенергії для великих промислових споживачів і мікромереж з метою пом'якшення наслідків використання відновлюваних джерел енергії з мінливою вихідною потужністю.

Електрохімічні системи є другою (за величиною встановленої ємності) технологією зберігання енергії у світі.

Свинцево-кислотні (Pb-A) акумулятори (батареї) є найстарішим, найдешевшим, добре розробленим і широко використовуваним електрохімічним пристроєм накопичення енергії. Основні характеристики Pb-A батарей включають низьку вартість і простоту виготовлення, високу надійність й ефективність, низьку швидкість саморозряду, достатню швидкодію, високу питому потужність і простоту переробки. Pb-A є популярним накопичувачем енергії як джерело резервного живлення в діапазоні від кВт до десятків МВт, використовуються для підтримки якості електроенергії, згладжування мінливості потужності, що виробляється відновлюваними джерелами. Однак, їх застосування в електроенергетиці обмежене через короткий життєвий цикл і низьку енергетичну щільність, недостатню продуктивність при низькій температурі, високі вимоги до технічного обслуговування та впливу на навколишнє середовище.

Нікель-кадмієві батареї (Ni-Cd) мають високу ефективність, дуже низькі вимоги до обслуговування, малий рівень саморозряду (10% на місяць) і працюють у широкому діапазоні температур (від - 40 до 50 °C). Основним обмеженням Ni-Cd акумулятора є його вплив на навколишнє середовище. В даний час Ni-Cd акумулятори ще не дуже широко використовуються в енергосистемах через високу вартість й екологічні міркування.

Натрій сірчані (Na-S) батареї мають тривалий термін служби, високу

щільність енергії, швидкий відгук, гарну можливість переробки та високу вихідну потужність. Найбільш поширене застосування Na-S батарей пов'язане з керування енергією високої потужності, наприклад для згладжування вихідної потужності вітрових електростанцій, вирівнювання навантаження та компенсації пікових навантажень. Однак основними обмеженнями Na-S акумуляторів є високі початкові капітальні витрати, вимога до використання високих температур з метою забезпечення їх роботи та високий добовий саморозряд.

Батареї NaNiCl_2 мають вищу напругу елемента (2,58 В), більший термін служби, вищу потужність порівняно з акумуляторами Na-S та повністю придатні для вторинної переробки. Вони мають потенціал для застосування в мережах з ВДЕ з метою згладжування їх переривчастої потужності, зменшення пікових навантажень і зсуву навантаження у часі. Однак ці батареї мають низьку щільність енергії порівняно з Na-S батареями та проблеми безпеки через наявність розплавленого натрію.

Літій-іонні (Li-ion) акумулятори мають низький відсоток саморозряду, що не перевищує 8% на місяць, високе співвідношення енергії до ваги, великий життєвий цикл, високу ефективність циклу та швидкість відгуку, низький вплив на навколишнє середовище. Крім того, Li-ion батареї мають високу потужність (від 1 кВт до 100 МВт) і енергією понад 200 МВт*год. Ці характеристики роблять Li-ion акумулятори хорошим кандидатом для застосування у додатках, де потрібні швидкість відгуку, висока потужність і щільність енергії, велика циклічність і легкість, наприклад, у секторі відновлюваної енергетики, електромобілях (EV) або гібридних електромобілях (PHEV). Однак ціна Li-ion акумулятора вище порівняно з іншими акумуляторними батареями.

Проточні батареї мають малий час відгуку, дуже низький рівень саморозряду, велику тривалість розряду, високу ефективність, можливість роботи при кімнатній температурі, низькі витрати на технічне обслуговування та відсутність емісії шкідливих речовин. Однак вони також мають низьку щільність енергії та високі витрати на виробництво порівняно з іншими акумуляторними

батарей. В даний час деякі типи проточних батарей, такі як ванадієві окислювально-відновні, бромно-цинкові і полісульфідно-бромідні використовуються або потенційно можуть бути використані для інтеграції ВДЕ в електричні мережі, для балансування навантаження, покращення якості електричної енергії та забезпечення резервного живлення.

1.3 Сфери застосування СНЕ

Попередньо, до обговорення завдань оптимального застосування засобів акумулювання у системах розподілу електричної енергії, необхідно розглянути та проаналізувати, насамперед, такі аспекти цієї проблеми, як визначення переліку характерних завдань, які доцільно вирішувати у розподільних мережах із залученням систем накопичення енергії; особливості кожної з технологій та відповідних окремих пристроїв акумулювання, які доцільно задіяти для вирішення окремих завдань; технічні характеристики конкретних пристроїв акумулювання, ступінь їхньої готовності (зрілості) для широкого промислового застосування та перспективу розвитку; вартісні характеристики пристроїв акумулювання та прогноз їх змін у короткостроковому та довгостроковому плані.

Існує дуже багато досліджень, в яких було проведено класифікацію різних систем накопичення енергії як щодо їх застосування залежно від ієрархічного рівня конкретного об'єкта в структурі енергосистеми (табл. 1.1), так і виходячи, наприклад, з їхньої швидкодії (рис. 1.3, рис. 1.4).

Таблиця 1.1 - Послуги, що забезпечуються системами накопичення енергії в електроенергетиці [7]

Послуги в сфері генерації	Допоміжні послуги	Послуги в сфері систем передачі	Послуги в сфері систем розподілу	Послуги споживачам
Енергетичний арбітраж	Первинне регулювання частоти	Відтермінування інвестицій	Підтримка потужності	Зменшення пікового навантаження

Підтримка потужності	Вторинне регулювання частоти	Підтримка стійкості	Підтримка у непередбачуваних ситуаціях	Управління цінами
Оптимізація роботи традиційних джерел генерації	Третинне регулювання частоти	Підтримка систем передачі	Відтермінування інвестицій	Якість електричної енергії
Підтримка потужності ВДЕ	Стабілізація частоти		Якість електричної енергії	Максимізація власної генерації
Мінімізація обмежень використання ВДЕ	Відновлення роботи		Динамічне локальне регулювання напруги	Управління платою за попит
Обмеження збурень	Підтримка напруги		Навмисне відокремлення	Безперервність електропостачання
			Обмеження збурень	Обмеження збурень
			Компенсація реактивної потужності	Компенсація реактивної потужності
				Інтеграція електромобілів

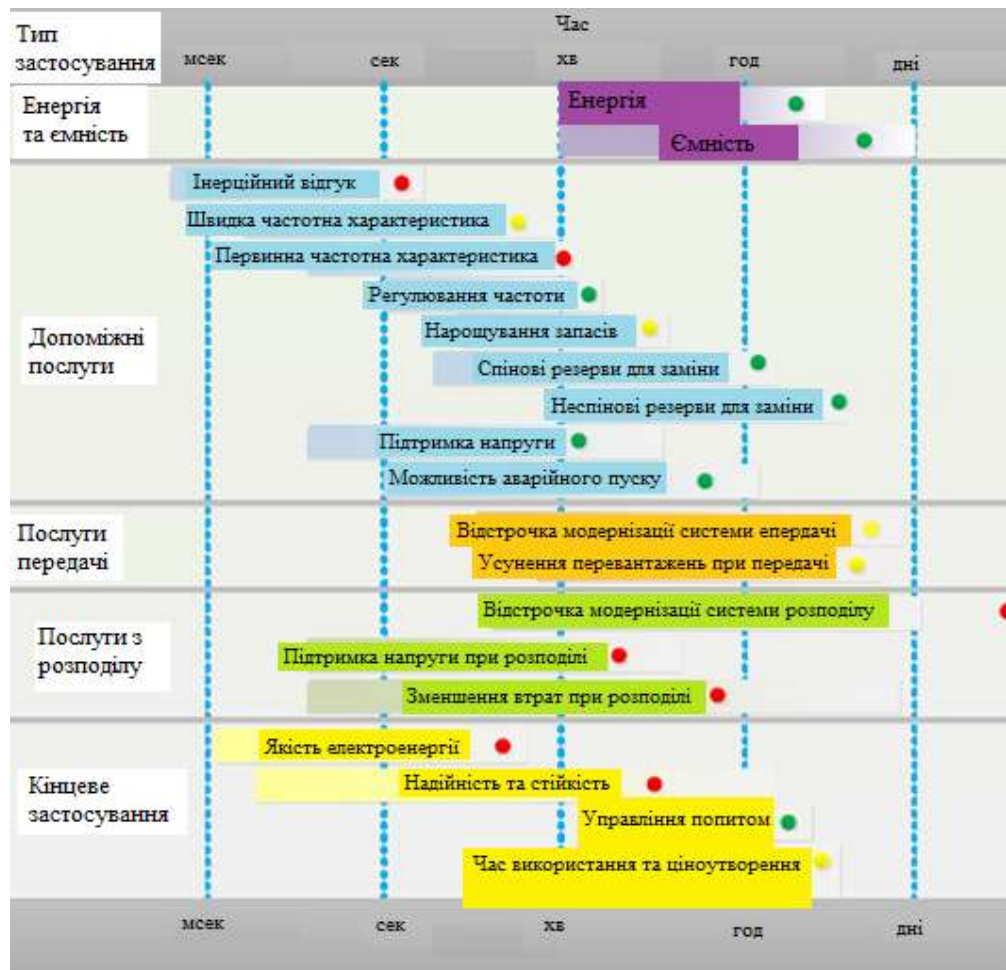


Рисунок 1.3 - Рекомендації щодо застосування систем накопичення енергії в електроенергетичному секторі [8]

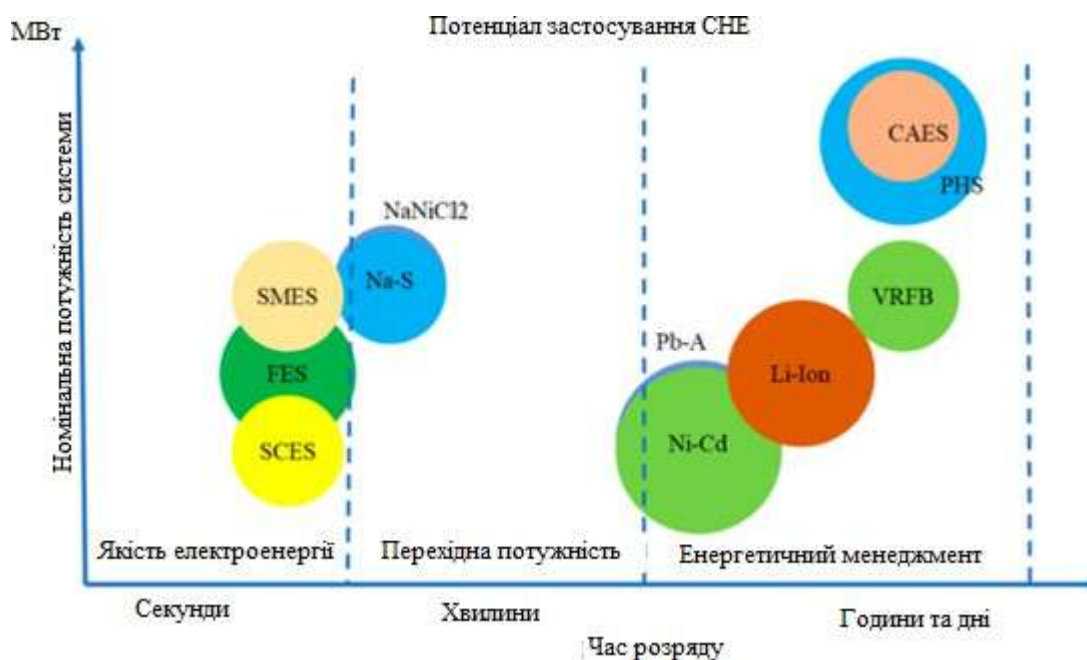


Рисунок 1.4 - Порівняння систем накопичення енергії залежно від потужності та часу відгуку (швидкості) [9]

Так, наприклад, у відповідних документах Європейського союзу [7] задачі, для вирішення яких можуть бути використані системи накопичення енергії, класифікуються наступним чином

Послуги в сфері генерації та системи передачі

- *Арбітраж* – це практика використання різниці в ціні електроенергії на оптовому ринку електроенергії. Накопичувачі використовуються для купівлі енергії за низькою ціною та продажу її за вищою ціною.

- *Підтримка потужності* – це використання накопичувача енергії замість джерел генерації на органічному паливі для забезпечення необхідної потужності системи в режимі максимального навантаження.

- *Участь в оптимізації роботи традиційних джерел генерації* - полягає у здатності систем накопичення енергії підтримувати навантаження генератора під час його зупинки на термін поки не запуститься новий генератор або не буде перезапущено той самий генератор, можливості уникнути зупинки генератора (і пов'язаних з цим витрат на його запуск) за рахунок зарядження системи накопичення в моменти низького навантаження, спроможності компенсації сильних та швидких коливань навантаження, даючи достатньо часу даному генератору для збільшення/зниження рівня виробництва електроенергії відповідно до технічних рекомендацій, щоб оптимальним чином реагувати на зміни навантаження.

- *Підтримка потужності ВДЕ* полягає у використанні накопичувачів енергії, щоб зробити змінну потужність ВДЕ більш постійною протягом певного періоду часу. Ця функція також передбачає можливість компенсації короткочасної мінливості потужності вітрогенераторів, спричиненої зміною швидкості вітру, та фотоелектричної генерації через затінення, спричинене хмарами.

- *Мінімізація обмежень використання ВДЕ* - використання накопичувачів енергії для поглинання енергії ВДЕ, що не диспетчеризуються (вітрових або сонячних), яка, з тих чи інших причин, не може бути поставлена в

електричну мережу. За потреби її можна доставляти до електромережі в інші проміжки часу або перетворювати в інші енергоносії (газ, тепло, водень і т.д.).

- *Обмеження збурень* - акумулювання енергії використовується з метою мінімізації впливу збурень, як короткострокових (від декількох секунд до хвилин), так і довгострокових (від декількох хвилин до годин), викликаних нерівномірністю генерації з боку ВДЕ.

- *Відтермінування інвестицій* у системи передачі – це використання накопичувачів енергії для вирішення проблем перевантаження елементів систем передачі, таким чином, відкладаючи необхідність оновлення її інфраструктури.

Системні послуги/допоміжні послуги

- *Первинне регулювання частоти* спрямоване на стабілізацію частоти системи на стаціонарному значенні після збурення або інциденту протягом секунд, але без відновлення частоти системи до її еталонного значення.

- *Вторинне регулювання частоти* – це централізоване автоматичне керування, яке регулює виробництво активної потужності джерелами генерації для відновлення частоти до її цільового значення.

- *Третинне регулювання частоти* використовується як резерв первинного та вторинного регулювання частоти,

- *Стабілізація частоти* – це послуга, яка спрямована на підтримку стабільності частоти, допомагаючи уникнути відключення навантаження завдяки дуже швидкому відгуку розподілених систем зберігання енергії.

- *Відновлення роботи* (Black start) — це використання накопичувачів енергії для відновлення роботи системи, електростанції чи підстанції після знеструмлення, оскільки для цього потрібна деяка кількість електроенергії, яку неможливо взяти з мережі.

- *Підтримка напруги* – допомога при забезпеченні певного рівня напруги, що традиційно здійснювалось шляхом видачі або поглинання реактивної потужності за допомогою синхронних або статичних компенсаторів.

Послуги в сфері систем розподілу

- *Підтримка потужності* – це використання накопичувача енергії для переміщення навантаження у часі, наприклад з періодів пікового на навантаження базового навантаження, щоб зменшити максимальні струми, що протікають через завантажені мережі.
- *Підтримка електромережі на випадок непередбачених ситуацій* – це використання накопичувачів енергії для підтримки пропускну здатності мережі та рівня напруги з метою зменшення наслідків втрати живлення від основного джерела.
- *Відтермінування інвестицій* – це використання накопичувачів енергії для відстрочення модернізації інфраструктури системи розподілу.
- *Якість електроенергії* означає використання оператором системи розподілу накопичувачів енергії для підтримки профілю напруги в прийнятних межах.
- *Динамічне локальне регулювання напруги* має на меті підтримувати профіль напруги в договірних або нормативних межах.
- *Навмисне відокремлення* (створення острівного режиму роботи)
- *Обмеження збурень* на вищих рівнях пов'язане з тим фактом, що оператори систем розподілу (ОСР) мають контракт на доступ до мережі високої напруги за правилами, встановленими відповідно до Кодексів мереж, що вимагає від ОСР обмеження збурень, які вони спричинюють у мережах високої напруги, у відповідності з договірними значеннями.
- *Компенсація реактивної потужності* – це внесок накопичення енергії в баланс реактивної потужності у мережі.

Послуги споживачам з енергоменеджменту

- *Зменшення пікових навантажень* кінцевим користувачем — щоб мінімізувати частину рахунків, які змінюється відповідно до їхнього максимального споживання електроенергії.
- *Управління цінами* на енергію за часом використання – це використання накопичувачів енергії, які заряджаються, коли ставки низькі, і використовуються в години пікового навантаження, з метою зменшення

рахунків для кінцевих користувачів.

- *Якість електроенергії* – ця функція спрямована на використання накопичувачів для забезпечення рівня якості електроенергії, який перевищує те, що пропонує система.

- *Максимізація власного виробництва та власного споживання* — це використання накопичувачів енергії на ринках з високою вартістю енергії для збільшення власного споживання в поєднанні з відновлюваним джерелом енергії. Типовим прикладом є поєднання акумуляторів і фотоелектричних батарей.

- *Управління платою за попит* — це використання накопичувачів енергії для зниження загальних витрат споживачів на послуги з постачання електроенергії шляхом зменшення плати за попит у періоди пікового навантаження, які визначені поставщиком.

- *Безперервність енергопостачання* стосується здатності накопичувача енергії замінювати мережу в разі переривання централізованого електропостачання.

- *Обмеження збурень.*
- *Компенсація реактивної потужності.*
- *Інтеграція електромобілів.*

1.4 Стан та перспективи розвитку технологій накопичення енергії

Однак не всі з перерахувань вище технологій накопичення енергії знайшли на сьогодні широке застосування в електроенергетичній сфері. Деякі з них перебувають на стадії демонстраційних проектів чи навіть лабораторного тестування. Дані, отримані з різних джерел (рис.1.5, рис. 1.6), показують приблизно однакову номенклатуру технологій накопичення енергії реалізованих на даний час на практиці.

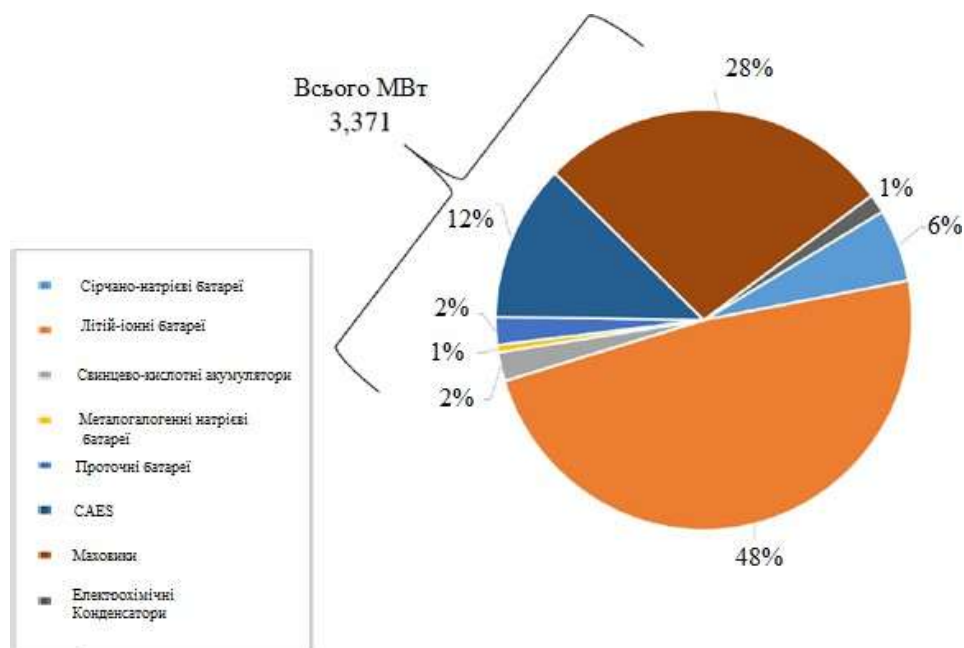


Рисунок 1.5 - Розподіл потужності систем накопичення енергії, які експлуатуються в світовій енергетиці [10]

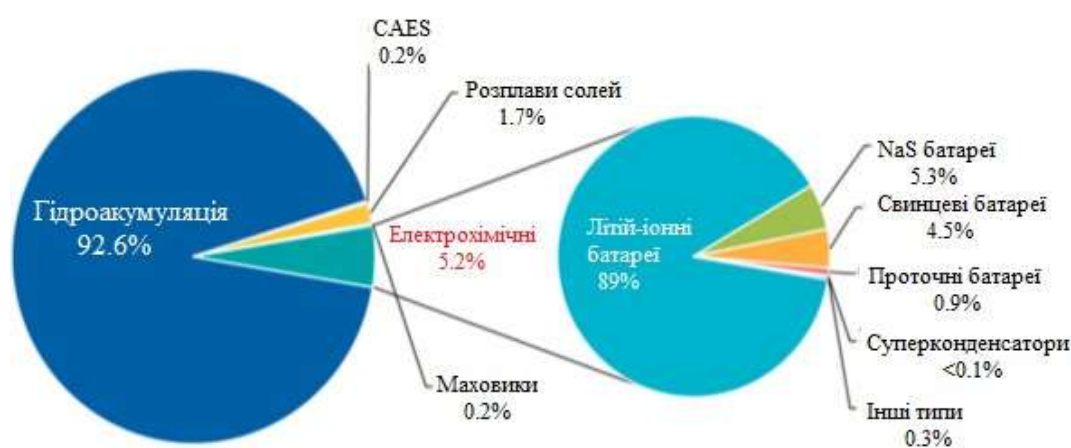


Рисунок 1.6 - Структура глобальної світової потужності систем накопичення енергії [4]

Аналіз наведених матеріалів дозволяє окреслити коло технологій накопичення енергії, які можуть розглядатися як конкуруючі (або такі, що доповнюють одна одну) при орієнтації на їхнє застосування в системах розподілу електричної енергії. Насамперед, до відповідних засобів накопичення енергії слід віднести: маховики, суперконденсатори та батареї різного типу.

Може скластися враження, що зараз рано говорити про широке комерційне застосування у сфері акумуляування енергії таких технологій як

суперконденсатори та маховики. Однак, результати досліджень свідчать, що дані технологи не тільки постійно вдосконалюються в плані поліпшення їх технічних характеристик, але і мають тенденцію до істотного зниження витрат, пов'язаних з їхнім застосуванням в електроенергетиці (Таб. 1.2, Таб. 1.3).

Таблиця 1.2 - Прогноз зміни техніко-економічних показників суперконденсаторів [12]

	Поточний стан	Мета 2030	Мета 2050
Напруга	3 В	4 В	4,5 – 5 В
Щільність енергії	4 – 8 Вт час/кГ	50 Вт час/кГ	75 Вт час/кГ
Щільність потужності	10 – 20 кВт/кГ	40 кВт/кГ	60 кВт/кГ
Питома ємність	6 Ф/гр	50 Ф/гр	600 Ф/гр
Кількість циклів	0,5 – 1 М	1,5 М	> 2 М
Мінімальна температура	- 40 °С	- 40 °С	- 40 °С
Максимальна температура	65 °С	100 °С	125 °С
Євро/Вт	0,3	0,2	0,05
Євро/Ф	0,015	0,005	0,002

Таблиця 1.3 - Прогноз зміни техніко-економічних показників маховиків

Поточний стан	Мета 2030	Мета 2050
Життєвий цикл > 100 000 циклів; Потужність 100 – 1500 кВт; Енергетична ємність 0,5 – 50 кВт год; Загальна ефективність 80 – 90%; Вартість > 3000 євро/кВт год 1000 – 2000 євро/кВт.	Зменшене тертя; Підвищена швидкість обертання; Підвищена ємність; Магнітні підшипники; Композитні матеріали; Вартість < 3000 євро/кВт год.	Енергетична щільність > 100 Вт год/кГ; Вартість < 300 євро/кВт год.

При виборі конкретного типу батарей є доцільність проаналізувати

ступінь зрілості відповідних технологій (Таб. 1.4).

Таблиця 1.4 - Стан електрохімічних технологій накопичення енергії з погляду готовності для комерційного застосування в електроенергетиці [13]

Стан	Технології накопичення енергії
Зрілий	Свинцево-кислотні (Pb-A), нікель-кадмієві (Ni-Cd), нікель-металогідридні (NiMH),
Комерціалізований	Літій-іонні (Li-ion), натрій-сірчані (NaS), натрій-нікель-хлоридні (NaNiCl ₂), цинко-бромні (ZnBr), проточні ванадієві (VRFB), цинково-повітряні (Zn-air)/
Демонстративний	Удосконалені Pb-A, Li-ion, проточні батареї.
Прототипи	Залізо-хромові проточні (FeCr).
Лабораторний	На основі магнію (Mg) та алюмінію (Al), батареї з твердими та органічними електролітами.
Концептуальний	Металево-повітряні (Me-air).

Крім цього, для визначення конкретних сфер застосування електрохімічних батарей у розподільних мережах важливо проаналізувати ступінь швидкодії кожної з використовуваних технологій. (Таб. 1.5).

Таблиця 1.5 - Швидкодія батарей (час розрядки) в залежності від використовуваних технологій [12]

Тип накопичення	Показник	Тривалість зберігання	Pb-A	Ni-Cd	Li-ion	NaS	NaNiCl ₂	Проточні
Швидкодіючий накопичувач	Якість електроенергії	< 1 хв	😊	😞	😊	😞	😞	😊
	Стабільність енергосистеми	1 – 15 хв	😊	😊	😊	😊	😊	😊
Зберігання потужності		15 – 60 хв	😊	😊	😊	😊	😊	😊
Зберігання енергії	Щодня	6 год	😊	😞	😊	😊	😊	😊
	Щотижня	30 – 40 год	😞	😞	😞	😊	😊	😊
	Щомісяця	168-720 год	😞	😞	😞	😞	😞	😞

😊	Підходить
😞	Менш підходить
😞	Не підходить

У той же час, при вирішенні задач техніко-економічного обґрунтування впровадження систем накопичення енергії, визначення їх оптимального складу, місць розташування, параметрів й режимів роботи значні складнощі пов'язані з тим, що в наявній відповідній технічній літературі наведені основні технічні й вартісні характеристики мають дуже високий рівень невизначеності. Так, у якості прикладу в Таб. 1.6 – Таб. 1.10 наведені деякі характеристики прийнятих до розгляду засобів накопичення енергії, отримані в процесі аналізу достатньо великої кількості бібліографічних джерел [14 – 22].

Таблиця 1.6 - Основні технічні характеристики засобів накопичення енергії, орієнтованих на використання в розподільних системах

Технічний засіб накопичення енергії	Потужність МВт	Енергетична щільність Вт год/л	Щільність потужності Вт/л	Загальна ефективність %
FES	0,1 - 20	20 - 80	1000 - 2000	90 - 95
Pb - A	0 - 40	50 - 80	10 - 400	70 - 90
Ni - Cd	0 - 40	60 - 150	150 - 300	65 - 90
Na - S	0,05 - 34	150 - 250	150 - 230	80 - 90
NaNiCl ₂	0 - 3	150 - 180	220 - 300	85 - 90
Li - ion	0 - 100	200 - 500	500 - 2000	85 - 97
VRFB	0,3 - 3	16 - 70	0,5 - 2	75 - 90
SCES	0 – 0,3	2,5 - 15	500 - 5000	90 - 98

Таблиця 1.7 - Основні технічні характеристики засобів накопичення енергії, орієнтованих на використання в розподільних системах

Технічний засіб накопичення енергії	Час розряду мсек - год	Час відгуку (швидкодія) мсек - год	Життєвий цикл рік	Добовий саморозряд %
FES	мсек – 15 мин	< 4 мсек - сек	15	24 - 100
Pb -A	сек - год	5 – 10 мсек	3 - 15	0,1 – 1,1
Ni - Cd	сек - год	20 мсек - сек	10 - 20	0,07 – 0,7
Na - S	сек - год	1 мсек - сек	10 - 15	20
NaNiCl ₂	сек - год	< сек	10 - 14	11,9 – 26,2

Li - ion	хв - год	20 мсек	5 - 15	0,03 – 0,3
VRFB	сек - год	сек	5 - 10	незначний
SCES	мсек – год	8 мсек	20	0,5- 40

Таблиця 1.8 - Основні економічні характеристики засобів накопичення енергії, орієнтованих на використання в розподільних системах

Технічний засіб накопичення енергії	Питома вартість потужності \$/кВт	Питома вартість енергії \$/кВт год	Вплив на навколишнє середовище
FES	250 - 380	200 - 5000	Дуже низький
Pb - A	200 - 650	50 - 1100	Високий
Ni - Cd	500 - 1500	330 - 3500	Високий
Na - S	380 - 3200	150 - 900	Високий
NaNiCl ₂	150 - 300	100 - 350	Низький

У зв'язку з цим практичний інтерес для подальших досліджень може представляти відносна оцінка різних технічних засобів накопичення енергії за рядом показників. Результати відповідних досліджень, наведені на рис. (1.7 – 1.13), й можуть бути використані при реалізації відповідного аналізу щодо застосування засобів накопичення енергії в розподільних системах у вигляді кількісних або якісних (лінгвістичних) оцінок [12].

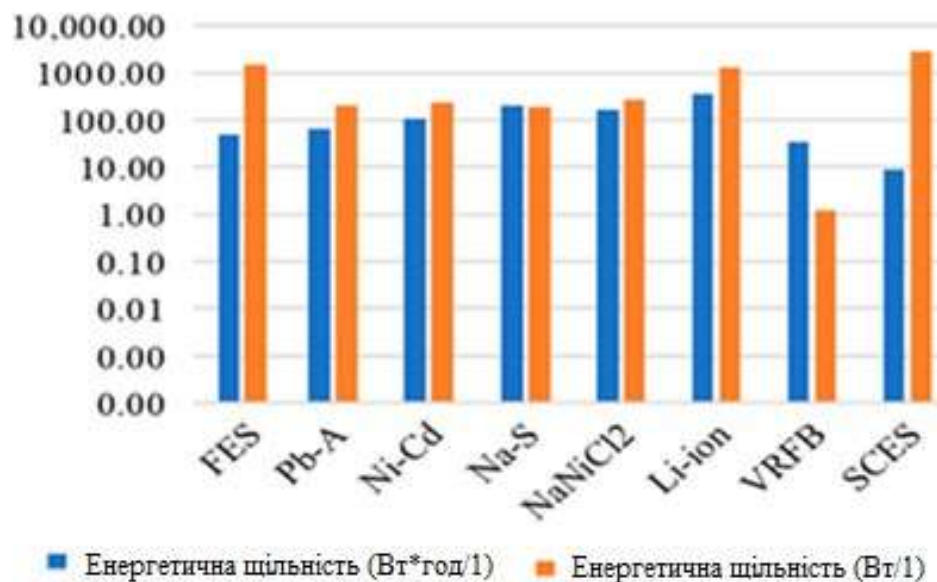


Рисунок 1.7 - Порівняння енергетичної щільності окремих технічних засобів накопичення енергії

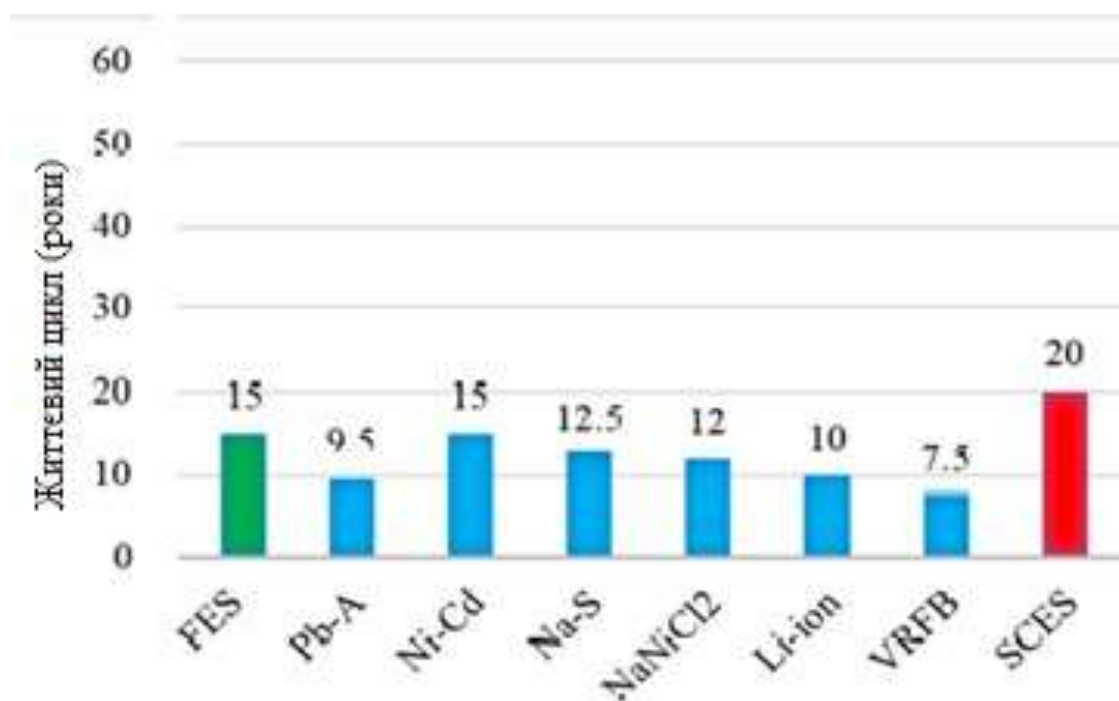


Рисунок 1.8 - Порівняння життєвого циклу окремих технічних засобів накопичення енергії



Рисунок 1.9 - Порівняння технологічної зрілості окремих технічних засобів накопичення енергії

Таблиця 1.9 - Порівняння життєвого циклу окремих технічних засобів накопичення енергії

Зрілість технології	Якісна оцінка	Кількісна оцінка (в балах)
Дуже зріла	Повністю комерціалізована	9
Дуже зріла	Комерціалізована	8
Зріла	Комерціалізована	7
Зріла	На стадії комерціалізації	6
Зріла	Обмежено впроваджена	5
Апробована	На стадії комерціалізації	4
Апробована	Обмежено впроваджена	3
Апробована	На стадії розвитку	2
На стадії досліджень	На стадії розвитку	1

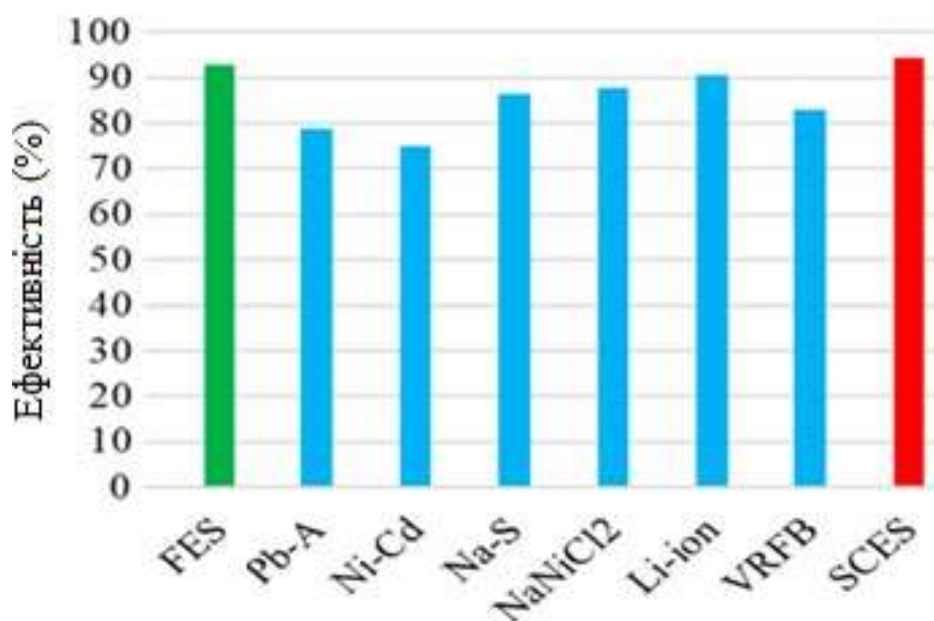


Рисунок 1.10 - Порівняння загальної ефективності окремих технічних засобів накопичення енергії

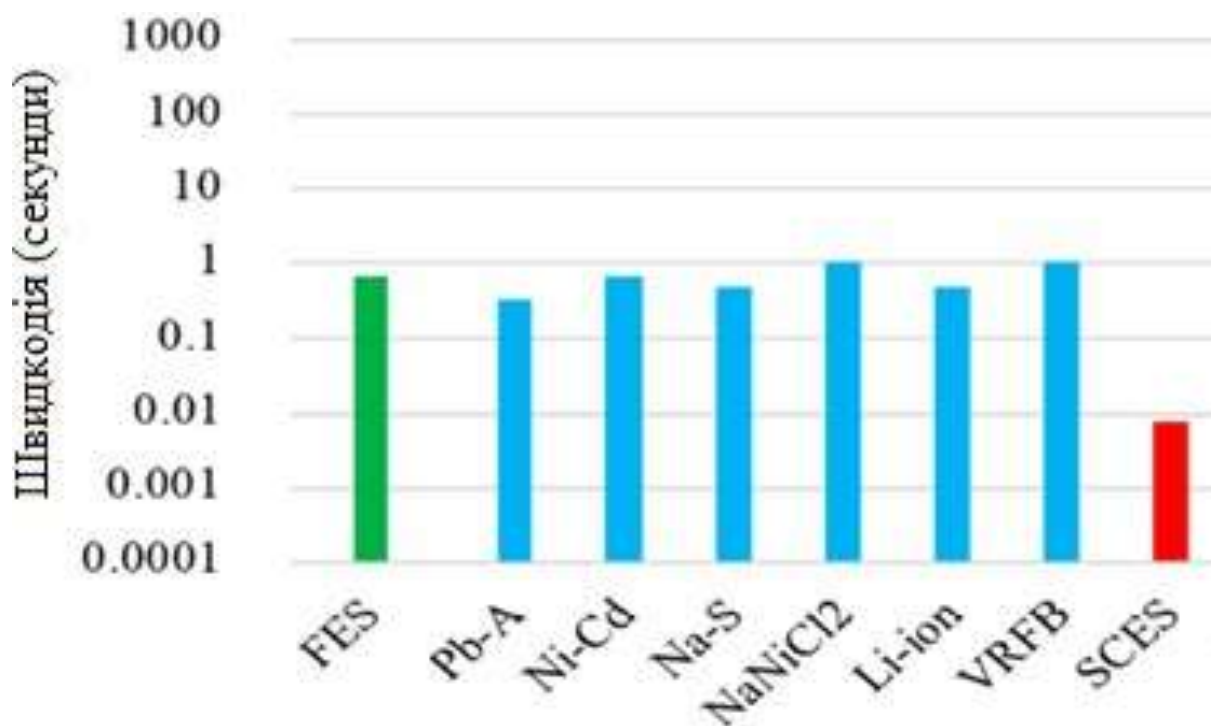


Рисунок 1.11 - Порівняння швидкодії окремих технічних засобів накопичення енергії

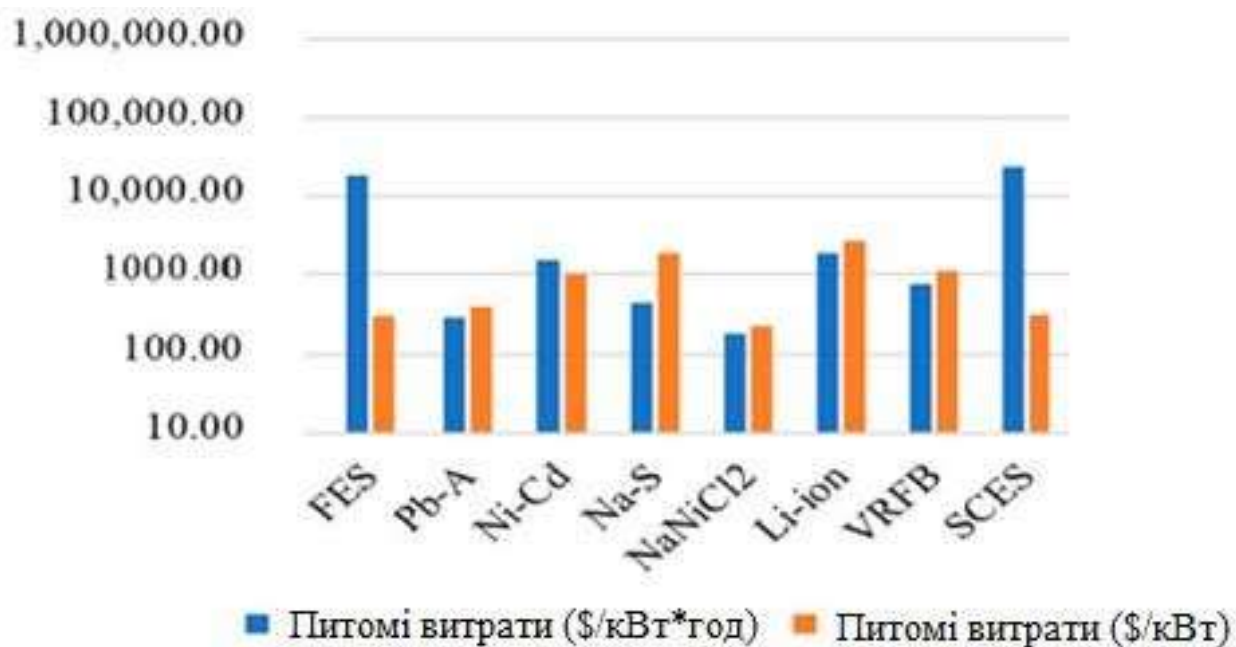


Рисунок 1.12 - Порівняння питомих витрат для окремих технічних засобів накопичення енергії



Рисунок 1.13 - Порівняння впливу на навколишнє середовище окремих технічних засобів накопичення енергії

Таблиця 1.10 - Порівняння впливу на навколишнє середовище окремих технічних засобів накопичення енергії

Вплив на навколишнє середовище	Оцінка (в балах)
Виключно великий	8
Дуже великий	7
Великий	6
Відносно великий	5
Середній	4
Нижче середнього	3
Низький	2
Дуже низький	1

Надалі розглянемо більш детально окремі технічні засоби накопичення енергії, які, на підставі здійсненого аналізу, мають перспективу широкого промислового використання в системах розподілу електричної енергії.

Висновки до розділу 1

Узагальнюючи результати проведено аналізу можливо зробити наступні висновки, стосовно особливостей використання технологій та систем накопичення електричної в розподільних системах.

1. Досліджено технології накопичення енергії за їх технологічним призначенням. Сфери застосування засобів акумулювання визначаються виходячи з їх характеристик, таких як: час розряду, потужність, ємність, вартість технології, загальна ефективність, життєвий цикл. При інтеграції пристроїв акумулювання необхідно враховувати їх технічні особливості в залежності від кінцевої мети застосування.

2. Здійснений аналіз стану та динаміки розвитку технічних й вартісних показників різноманітних технологій накопичення енергії продемонстрував реальні перспективи широкого використання відповідних технічних засобів акумулювання енергії при вирішенні різноманітних задач в електроенергетичній галузі.

3. Узагальнення наявної інформації дало змогу диференціювати існуючі та перспективні СНЕ у відповідності з технологічними задачами, при вирішенні яких вони можуть бути використані найбільш ефективним чином. Вивчення технічних особливостей різноманітних засобів накопичення енергії дало змогу визначити коло СНЕ, використання яких буде найбільш обґрунтованим при вирішенні завдань притаманним системам розподілу електричної енергії.

4. Проведено аналіз практичного використання технологій накопичення в масштабах світового використання. Виконано порівняння ступеня зрілості технологій, їх техніко-економічних та екологічних

2 ВИКОРИСТАННЯ СИСТЕМ НАКОПИЧЕННЯ ЕНЕРГІЇ ДЛЯ ВИРІШЕННЯ ЗАДАЧ ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ КЕРУВАННЯ РЕЖИМАМИ РОЗПОДІЛЬНИХ СИСТЕМ

2.1 Обґрунтування доцільності використання систем накопичення енергії при вирішенні задач динамічного керування топологією розподільних мереж

Однією з найбільш поширених задач, що вирішуються під час планування і управління режимами роботи розподільних мереж, які мають розімкнену топологію, є вибір оптимальних місць розмикання їх контурів. Це завдання розглядалося найчастіше з позицій мінімізації втрат потужності та електричної енергії. В окремих випадках задача вирішувалася з метою підвищення надійності роботи мережі, забезпечення припустимих відхилень напруги або дані показники враховувалися як додаткові в процесі мінімізації втрат потужності (електричної енергії). Усі зазначені формулювання зазначеної задачі об'єднувало те, що в усіх випадках розглядалася проблема середньострокового планування, за умови, що місця розмикання контурів визначалися для характерних сезонів року (осінньо-зимового та весняно-літнього) і протягом зазначених періодів часу залишалися незмінними. Це обґрунтовувалося відносною стабільністю навантажень окремих вузлів мережі у межах зазначених часових інтервалів. Другим чинником, що зумовлював доцільність такого підходу, був той факт, що в розподільних мережах практично повсюдно використовувалися комутаційні апарати виключно з ручним керуванням, що унеможливлювало часту зміну їхнього стану. Таким чином, оптимальне рішення, прийняте на підставі аналізу режимів окремої доби певного сезону року, умовно вважалося оптимальним для всього сезону.

Ситуація почала кардинально змінюватися з поширенням використання в системах електропостачання розподіленої генерації, насамперед у ситуаціях, коли до окремих вузлів розподільної мережі почали підключатися відновлювані джерела енергії, відмінною рисою яких є суттєва нестабільність вихідної

потужності. У зв'язку з цим стало неможливим говорити про відносну стабільність режимів не лише в межах усього сезону року, а й навіть по окремим дням, в першу чергу, через випадковий характер зміни метеорологічних умов, що впливають на вироблення електроенергії відновлюваними джерелами.

У перспективі зростання електромобілів і, відповідно, поява в структурі систем розподілу енергії зарядних станцій, які теоретично можна розглядати не тільки як додаткове навантаження, але також у певному сенсі як засіб акумулювання та генерації електричної енергії, внесуть ще більшу неоднорідність у графіки електричних навантажень.

Зазначені фактори не можуть не викликати серйозних змін у традиційній структурі розподільних мереж і, насамперед, їх режимів, які стануть менш стабільними та більш непередбачуваними. Внаслідок цього, під впливом випадкових факторів у мережі формуватимуться поточкорозподіли різної тривалості, які в багатьох випадках істотно відрізнятимуться від того режиму (поточкорозподілу), для якого визначалися оптимальні місця розмикання контурів, що в результаті веде до зростання втрат електричної енергії, а потенційно і до порушення умов забезпечення допустимих відхилень напруги та зниження надійності. Тим самим, ефективність розв'язання задачі вибору оптимальних місць розмикання розподільчих контурів у традиційній постановці буде суттєво знижена.

Разом з тим, поява на ринку енергетичного обладнання нових вимикачів, що володіють збільшеним комутаційним ресурсом і можливістю дистанційного управління, а також істотно більш вартісного комутаційного обладнання, орієнтованого на використання засобів силової електроніки, і яке практично не має обмеження за кількістю комутацій, відкриває нові перспективи для вирішення питань вибору оптимальних місць розмикання розподільних мереж, переводячи їх із розряду завдань середньострокового планування у розряд завдань оперативного управління.

У цьому контексті підвищення ефективності вирішення задачі вибору оптимальної конфігурації мережі може бути досягнуто шляхом точкового розміщення та використання в окремих контурах мережі дистанційно керованих комутаційних апаратів замість вимикачів або роз'єднувачів з ручним приводом. Очевидно, що найбільший ефект подібне технічне рішення матиме у тому випадку, якщо відповідні зміни режиму мережі, що призводять до доцільності зміни її топології (точок розмикання контуру) з метою мінімізації втрат потужності, відбуваються відносно регулярно і є достатньо тривалими.

В даний час масштабне оснащення розподільних мереж комутаційними апаратами з дистанційним керуванням є не лише неможливим (з огляду на пов'язані з цим витрати), а й не доцільним. Разом з тим, у процесі моніторингу режимів розподільчих мереж можуть бути виділені окремі фідери, які характеризуються суттєвою неоднорідністю режимів. Насамперед, до таких можуть бути віднесені розподільні лінії з достатньо великим обсягом інтегрованих у них відновлюваних джерел розподіленої генерації, вихідна потужність яких залежить від багатьох випадкових факторів. У процесі ретроспективного аналізу режимів (чи за допомогою імітаційного моделювання, розглядаючи кілька характерних сценаріїв генерації з боку вітрових і сонячних станцій) визначається оптимальні для окремих режимів місця розмикання контуру. Найбільш поширені рішення використовуються для вибору місць розміщення дистанційно керованих комутаційних апаратів.

Очевидно, що ефективність, а, відповідно і доцільність, зміни місця розмикання контуру визначатиметься величиною додаткового зниження втрат електричної енергії, яке може бути при цьому досягнуто. Однак, кожне конкретне рішення щодо зміни місця розмикання контуру не може бути прийняте без урахування його впливу на комутаційний ресурс відповідних вимикачів. Тобто ефект від додаткового зниження втрат електричної енергії має перевищувати ті умовні втрати, які зазнає оператор системи розподілу, від прискореного витрачання комутаційного ресурсу задіяних у цьому процесі вимикачів.

Формально ухвалення будь-якого інноваційного технічного рішення потребує відповідного техніко-економічного обґрунтування. Крім фактору невизначеності інформації, що притаманне будь-якому завданню проектного характеру, в даному випадку виникають додаткові складнощі, пов'язані з обґрунтованим визначенням життєвого циклу проекту, який, у свою чергу, залежить від інтенсивності використання комутаційного ресурсу вимикачів.

Для вирішення цього питання, зокрема в [36], було запропоновано два підходи. Один з них, по суті, пов'язаний з визначенням граничної добової кількості комутацій, виходячи з директивно заданого особою, що приймає рішення, бажаного терміну використання відповідних комутаційних апаратів. Другий підхід є більш обґрунтованим, а й значно більш трудомістким. Він спрямований на визначення того мінімального економічного ефекту у вигляді додаткового зниження втрат електричної енергії, що може виправдати один цикл комутаційних операцій тобто дії пов'язаної зі зміною місця розмикання контуру розподільної мережі.

Таким чином, процедура прийняття рішення щодо доцільності зміни місця розмикання контуру може бути представлена наступним чином. У процесі моніторингу режиму розподільної мережі визначається момент часу, коли відповідно до поточного поточкорозподілу виникає доцільність зміни місця розмикання контуру. Здійснюється процес прогнозування режиму із послідовно зростаючим інтервалом попередження.

Одночасно з цим обчислюється очікуване значення додаткового (порівняно з тим, що має місце при існуючому місці розмикання контуру) зниження втрат потужності та енергії. Якщо накопичена в процесі прогнозування режиму величина додаткового зниження втрат енергії перевищить граничне економічно обґрунтоване значення, то приймається рішення про доцільність зміни місця розмикання контуру. В іншому випадку існуюче місце розмикання контуру залишається без зміни.

З представленого алгоритму випливає, що на першому етапі необхідно

тим чи іншим чином визначити умови, за яких, в принципі, є доцільним змінити топологію контуру розподільної мережі, що розглядається, з метою мінімізації втрат потужності відповідно до параметрів поточного режиму. Для спрощення та прискорення вирішення цього завдання (враховуючи, що воно має бути реалізовано практично в режимі реального часу) пропонується використовувати запропонований у роботі [37] відповідний індикативний показник.

Розглянемо наступний приклад (рис. 2.1). Визначимо сумарні втрати потужності для кожної частини контуру розподільної мережі з урахуванням існуючого місця його розмикання.

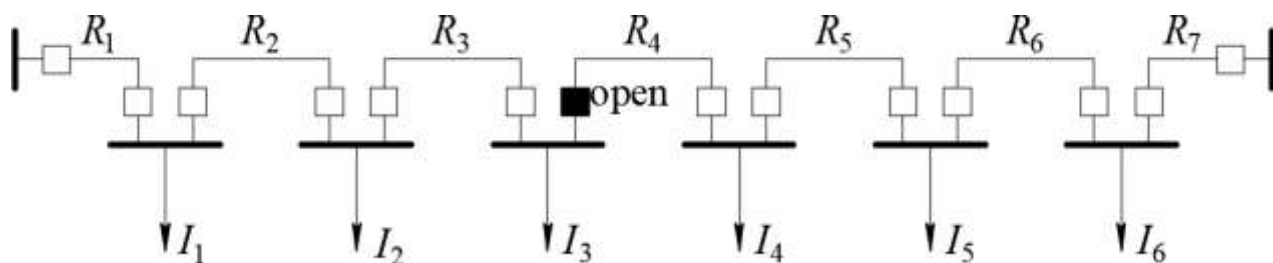


Рисунок 2.1 – Контур розподільної мережі

Припустимо, що розімкнута ділянка з опором R_4 .

В такому випадку:

$$\begin{aligned} \Delta P_I &= 3I_3^2 R_3 + 3((I_3 + I_2)^2 R_2 + 3(I_3 + I_2 + I_1)^2 R_1 = \\ &= 3I_3^2 R_3 + 3I_3^2 R_2 + 6I_3 I_2 R_2 + 3I_2^2 R_2 + 3I_3^2 R_1 + 6I_3 I_2 R_1 + 3I_2^2 R_1 + 3I_3^2 R_1 + 6I_3 I_1 R_1 + \\ &\quad + 6I_2 I_1 R_1 + 3I_1^2 R_1. \end{aligned} \quad (2.1)$$

Аналогічно для другої частини контуру маємо

$$\begin{aligned} \Delta P_{II} &= 3I_{ch}^2 R_5 + 3I_{ch}^2 R_6 + 6I_{ch} I_5 R_6 + 3I_5^2 R_6 + I_{ch}^2 R_7 + 6I_{ch} I_5 R_7 + 3I_5^2 R_7 + 6I_{ch} I_6 R_7 + 6I_5 I_6 R_7 \\ &\quad + 3I_6^2 R_7. \end{aligned} \quad (2.2)$$

Припустимо, що до одного з вузлів лівої частини контуру підключається джерело розподіленої генерації, що забезпечує струмову ін'єкцію в

мережу I_s (рис. 2.2). Очевидно, що при цьому у правій частині контуру сумарні втрати потужності не зміняться

$$\Delta P'_{II} = \Delta P_{II}. \quad (2.3)$$

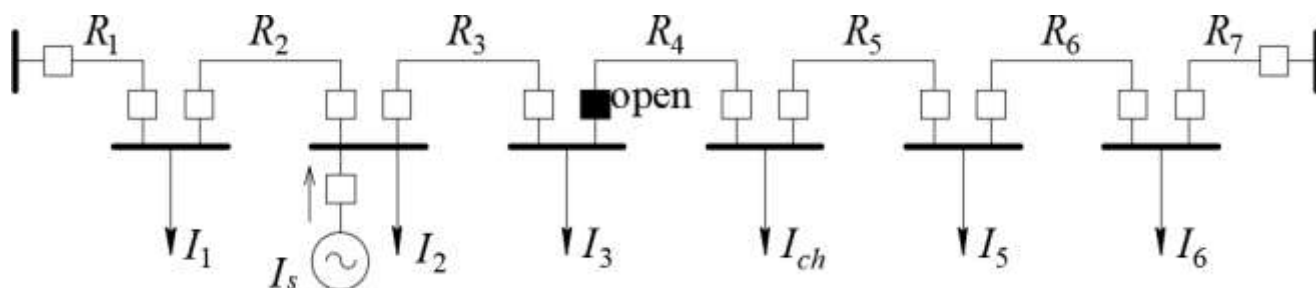


Рисунок 2.2 – Контур розподільної мережі з джерелом розподіленої генерації

У лівій частині контуру втрати потужності будуть становити

$$\begin{aligned} \Delta P'_I &= 3I_3^2 R_3 + 3(I_3 + I_2 - I_s)^2 R_2 + 3(I_3 + I_2 + I_1 - I_s)^2 R_1 = \\ &= 3I_3^2 R_3 + 3I_3^2 R_2 + 6I_3 I_2 R_2 + 3I_2^2 R_2 - 6I_3 I_2 R_2 - 6I_2 I_s R_2 + 3I_s^2 R_2 + 3I_3^2 R_1 + 6I_3 I_2 R_1 + \\ &+ 6I_3 I_1 R_1 + 6I_2 I_1 R_1 - 6I_3 I_s R_1 - 6I_2 I_s R_1 + 3I_1^2 R_1 - 6I_1 I_s R_1 + 3I_s^2 R_1. \end{aligned} \quad (2.4)$$

Логічно припустити, що після підключення до мережі джерела розподіленої генерації і, відповідно, часткового розвантаження лівої частини контуру, може виникнути доцільність перенесення місця розмикання вправо (рис. 2.3) з метою формування оптимального, з точки зору мінімізації втрат потужності, режиму.

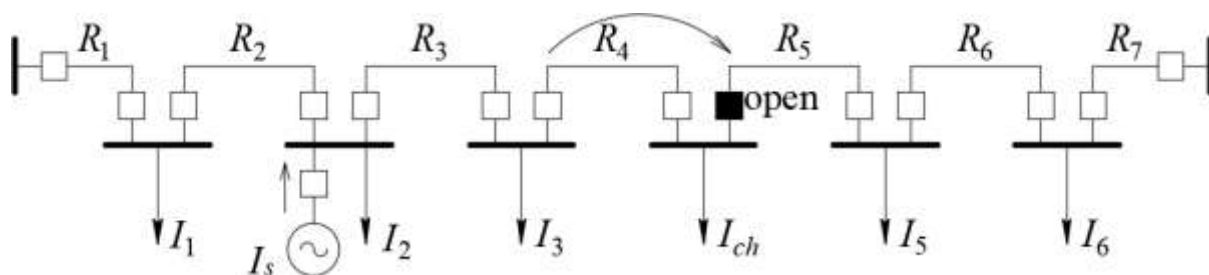


Рисунок 2.3 - Зміна місця розмикання контуру розподільної лінії (переміщення

вправо)

У цьому випадку сумарні втрати потужності у правій та лівій частинах контуру становитимуть:

$$\begin{aligned}\Delta P_I'' = & 3I_{ch}^2 R_4 + 3I_{ch}^2 R_3 + 6I_{ch} I_3 R_3 + 6I_{ch} I_3 R_3 + 3I_3^2 R_3 + 3I_{ch}^2 R_2 + 6I_{ch} I_3 R_2 + 3I_3^2 R_2 + \\ & 6I_{ch} I_2 R_2 + 6I_3 I_2 R_2 - 6I_{ch} I_s R_2 - 6I_3 I_s R_2 + 3I_2^2 R_2 - 6I_2 I_s R_2 + 3I_s^2 R_2 + I_{ch}^2 R_1 + 6I_{ch} I_3 R_1 + 3I_3^2 R_1 + \\ & + 6I_{ch} I_2 R_1 + 6I_{ch} I_1 R_1 - 6I_{ch} I_s R_1 + 6I_3 I_2 R_1 + 6I_3 I_1 R_1 - 6I_3 I_s R_1 + 3I_2^2 R_1 + 6I_2 I_1 R_1 + 3I_1^2 R_1 - \\ & - 6I_1 I_s R_1 + 3I_s^2 R_1.\end{aligned}$$

$$\Delta P_{II}'' = 3I_{\kappa}^2 R_{\kappa} + 3I_{\kappa}^2 R_7 + 6I_{\kappa} I_{\kappa} R_7 + 3I_{\kappa}^2 R_7. \quad (2.5-2.6)$$

Можна зробити висновок, що зміна місця розмикання контуру в даному випадку буде доцільною при виконанні наступної умови:

$$\Delta P_{II}'' + \Delta P_I' < \Delta P_{II}' + \Delta P_I' \quad (2.7)$$

Використовуючи вирази (2.1) – (2.6) шляхом нескладних перетворень можна показати, що умова (2.7) виконуватиметься, якщо:

$$\begin{aligned}I_{ch}(R_1 + R_2 + R_3 + R_4) + 2I_3(R_1 + R_2 + R_3) + 2I_2(R_1 + R_2) + 2I_1 R_1 - 2I_s(R_1 + R_2) < \\ I_{ch}(R_5 + R_6 + R_7) + 2I_5(R_6 + R_7) + 2I_6 R_7.\end{aligned}$$

Додавши до правої та лівої частин нерівності величину $I_{ch}(R_5 + R_6 + R_7)$, отримаємо:

$$I_{ch}(R_1 + R_2 + R_3 + R_4 + R_5 + R_6 + R_7) + 2I_3(R_1 + R_2 + R_3) + 2I_2(R_1 + R_2) + 2I_1R_1 - \\ - 2I_s(R_1 + R_2) - 2I_{ch}(R_5 + R_6 + R_7) + 2I_5(R_6 + R_7) + 2I_6R_7$$

Введемо такі позначення:

$$I_{ch}(R_1 + R_2 + R_3 + R_4 + R_5 + R_6 + R_7) = I_{ch}R_{\Sigma}, \\ I_1R_1 = M_1, \quad I_2(R_1 + R_2) = M_2, \quad I_3(R_1 + R_2 + R_3) = M_3, \quad I_s(R_1 + R_2) = M_s, \\ I_5(R_6 + R_7) = M_5, \quad I_6R_7 = M_6, \quad I_{ch}(R_5 + R_6 + R_7) = M_{ch} \\ R_{\Sigma} = R_1 + \dots + R_n,$$

де I_{ch} – навантаження, що переноситься в процесі зміни місця розмикання контуру.

Після цього отримуємо:

$$2(M_1 + M_2 + M_3) + I_{ch}R_{\Sigma} - 2M_s \langle 2(M_{ch} + M_5 + M_6) \rangle.$$

Прийнявши, що відносно схеми мережі (рис. 2.1)

$$M_1 + M_2 + M_3 = M_I, \quad M_{ch} + M_5 + M_6 = M_{II}$$

сформуємо умову, яка визначає доцільність перенесення місця розмикання контуру вправо, тобто з ділянки з опором R_4 на ділянку з опором R_5 .

$$M_{II} - M_I + M_s \rangle \frac{I_{ch}R_{\Sigma}}{2}.$$

$$I_4 \cdot (R_5 + R_6 + R_7) + I_5 \cdot (R_6 + R_7) + I_6 \cdot R_7 - I_1 \cdot R_1 \\ - (I_2 - I_s) \cdot (R_1 + R_2) - I_3 \cdot (R_1 + R_2 + R_3) > \frac{I_4 \cdot (R_1 + R_2 + R_3 + R_4 + R_5 + R_6 + R_7)}{2}$$

де I_{ch} – навантаження, що переноситься з одної частини контуру в іншу (у даному випадку I_4).

Подібним чином можна показати, що переміщення місця розмикання контуру у протилежний бік (в даному випадку вліво – рис. 2.4) буде обґрунтованим, якщо виконується умова:

$$M_I - M_{II} + M_s \rangle \frac{I_{ch} R_{\Sigma}}{2},$$

де у разі (рис. 3.4) $M_I = M_1 + M_2 + M_{ch}$, $M_{II} = M_4 + M_5 + M_6$.

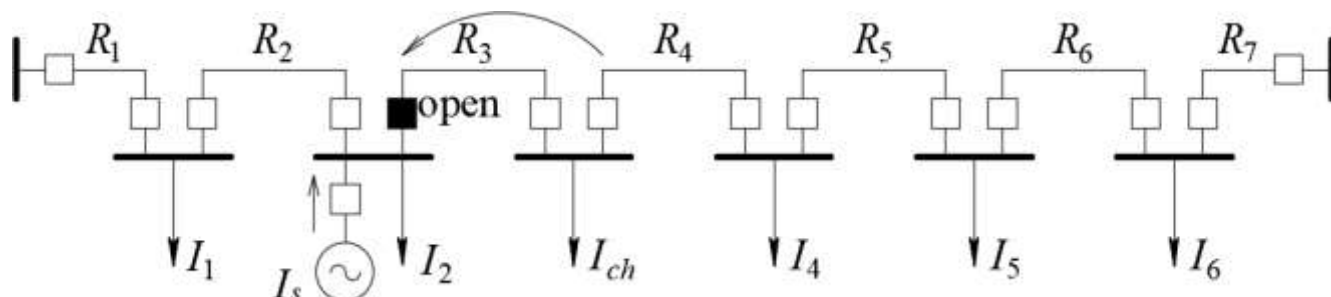


Рисунок 2.4 – Зміна місця розмикання контуру розподільної мережі (переміщення вліво)

Отримані результати можна поширити у разі, коли локальні джерела енергії інтегруються в обидві частини контуру (рис. 2.5). При цьому у якості подібних джерел, у загальному випадку, можуть умовно розглядатися і засоби акумулювання енергії. В останньому випадку величина струмової ін'єкції в мережу матиме негативне значення.

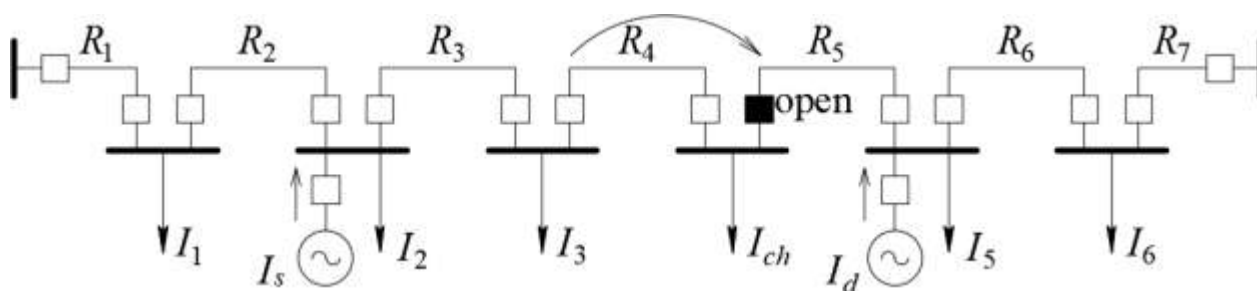


Рисунок 2.5 - Контур розподільної мережі з кількома локальними джерелами енергії

У разі поширення використання розподіленої генерації, найбільш очевидною, з точки зору доцільності зміни місця розмикання контуру, є ситуація, коли режими роботи інтегрованих у його ліву та праву частини локальних джерел не збігаються. Наприклад, одне з джерел збільшує рівень генерації енергії в мережу, потужність другого в той же період часу знижується

або навіть він переходить у режим споживання електроенергії, зокрема, якщо як подібне джерело розглядається пристрій, що акумулює.

В цьому випадку за аналогією з (2.8), (2.9) маємо:
переміщення місця розмикання контуру вправо (рис. 2.5) доцільно, якщо

$$M_{II} - M_I + M_s - M_d > \frac{I_{ch} R_{\Sigma}}{2}; \quad (2.10)$$

переміщення місця розмикання контуру вліво (рис. 2.4) доцільно, якщо

$$M_I - M_{II} - M_s + M_d > \frac{I_{ch} R_{\Sigma}}{2}, \quad (2.11)$$

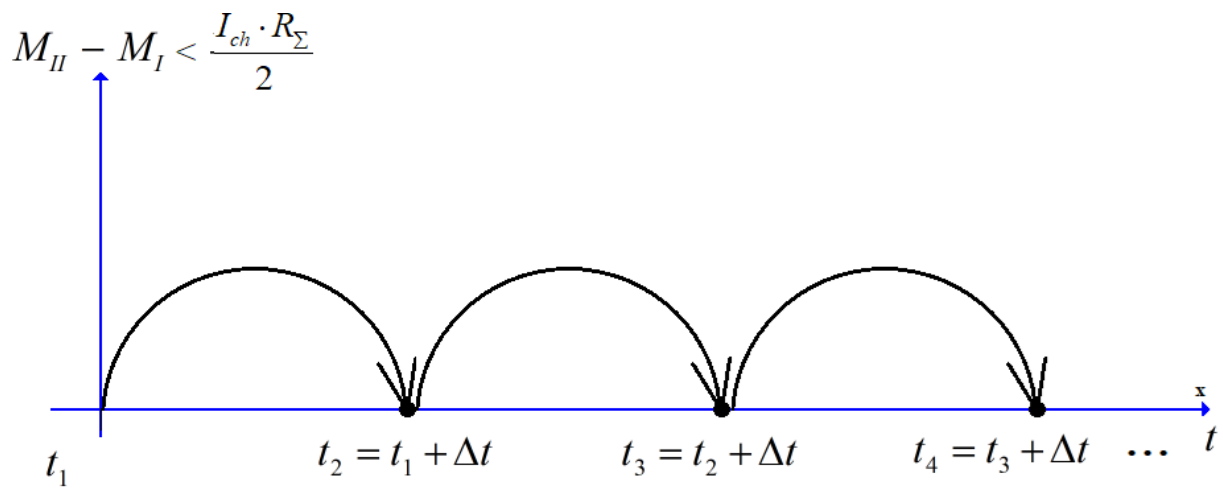
де індекси «s» і «d» відносяться до локальних джерел, що інтегруються відповідно до лівої та правої частини контуру.

У багатьох випадках розподільні мережі мають складнішу топологію. Наприклад, лінії можуть містити відгалуження, зокрема з розміщеними там локальними джерелами генерації. За аналогією з розглянутим вище прикладом можна довести, що в даному випадку також будуть справедливі вирази (2.8) - (2.11) з метою оцінки доцільності зміни місця розмикання контуру відповідно до параметрів поточного режиму.

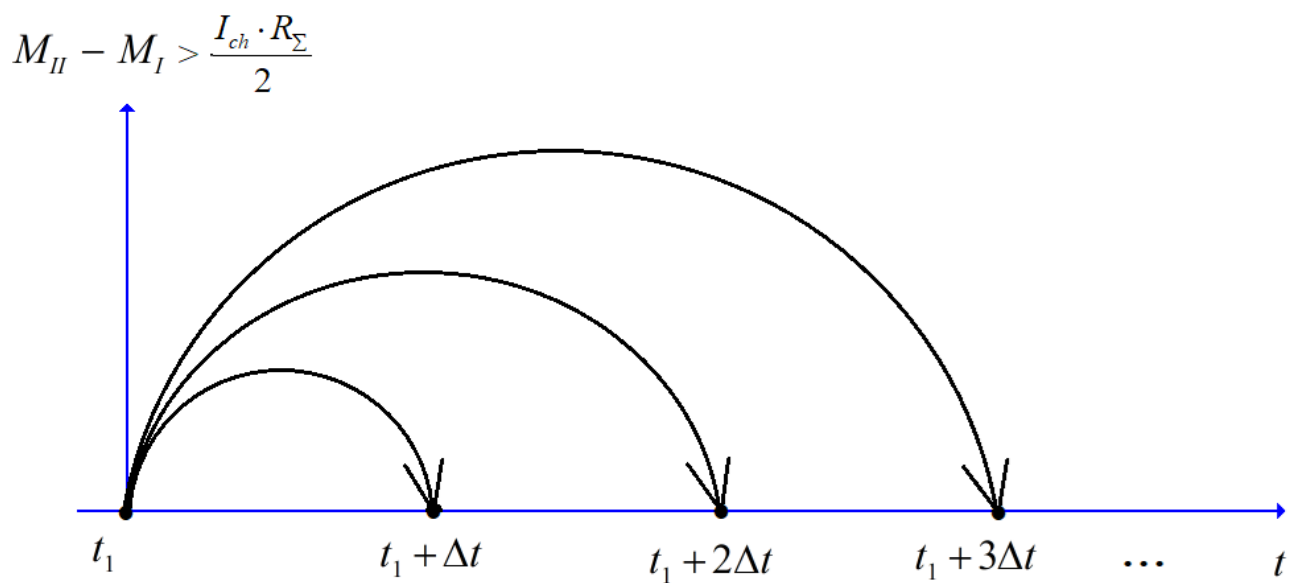
Таким чином, факт виконання умови (2.10) або (2.11), виявлений у процесі постійного моніторингу режиму контуру, що розглядається, свідчить відносно доцільність зміни місця його розмикання. На наступному етапі здійснюється прогнозування навантажень вузлів мережі, вихідний потужності локальних генеруючих джерел, а також на їх підставі відповідних індикативних показників, що є досить самостійним завданням [38] яке в даній роботі не розглядається. При цьому прогнозування здійснюється багаторазово з інтервалами попередження, що постійно зростають (рис. 2.6). До кожного прогнозного режиму перевіряється виконання умов (2.10) чи (2.11). Цим підтверджується доцільність збереження запропонованого нового положення місця розмикання контуру. При отриманні позитивного результату, як зазначалося раніше, паралельно ведеться розрахунок додаткового зниження

втрат потужності. Фізична зміна стану дистанційно керованих комутаційних апаратів здійснюється, якщо очікуваний накопичений позитивний ефект перевищить деяке попередньо обчислене економічно обґрунтоване граничне значення.

У той же час неоднорідність навантажень, а ще більшою мірою коливання вихідної потужності, що генерується інтегрованими в мережу відновлюваними джерелами розподіленої генерації, можуть призводити до того, що виконання умов (2.10) або (2.11) не є стабільним. Зазначена умова відповідно до прогнозних параметрів режиму виконується певному інтервалі часу (наприклад, інтервали часу $t_1, \dots, t_4$ – рис. 2.7), потім короткочасно перестає виконуватися (інтервали часу $t_4, \dots, t_6$ – рис. 2.7), далі знову починає виконуватися (інтервали часу $t_6, \dots, t_8$ – рис. 2.7) і т.п. Вочевидь, що у зазначених умовах використання дистанційно керованих комутаційних апаратів перестав бути доцільним. Разом з тим, ця ситуація може бути скоригована на рахунок примусової зміни режиму, зокрема, шляхом відповідного застосування систем накопичення енергії. При цьому в періоди часу, коли умови, що свідчать про доцільність зміни місця розмикання контуру, не виконуються (інтервали часу $t_4, \dots, t_6, t_8, \dots, t_{10}$ – рис. 2.7) за рахунок шляхом певних дій вносяться відповідні зміни у поточний розподіл в мережі, таким чином, щоб домогтися виконання умов, що свідчать про доцільність збереження нового місця розмикання контуру (рис. 2.8).



- а) Процедура прогнозування у випадку недоцільності зміни місця розмикання контуру



- б) Процедура прогнозування у випадку доцільності зміни місця розмикання контуру

Рисунок 2.6 – Процедура прогнозування у випадках доцільності та недоцільності зміни місця розмикання контуру

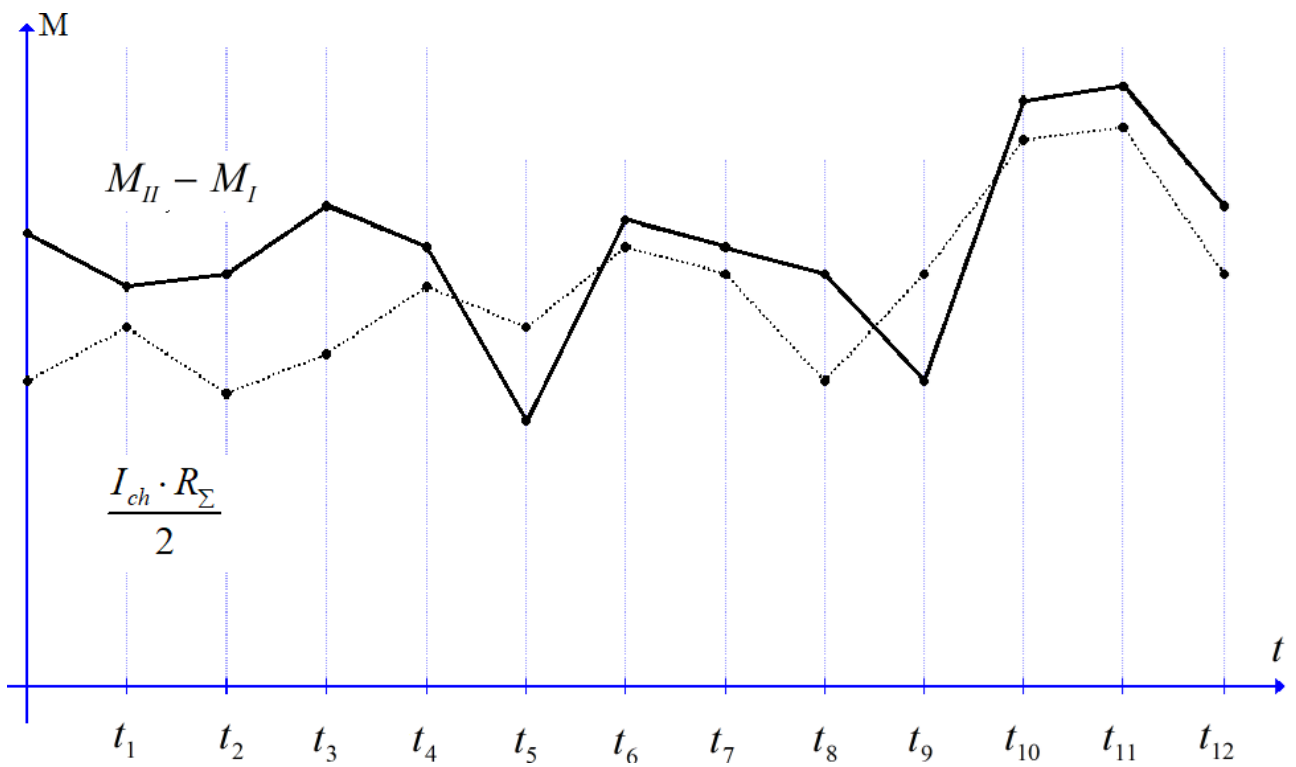


Рисунок 2.7 – Прогноз зміни параметрів режиму (індикативних показників) без використання СНЕ

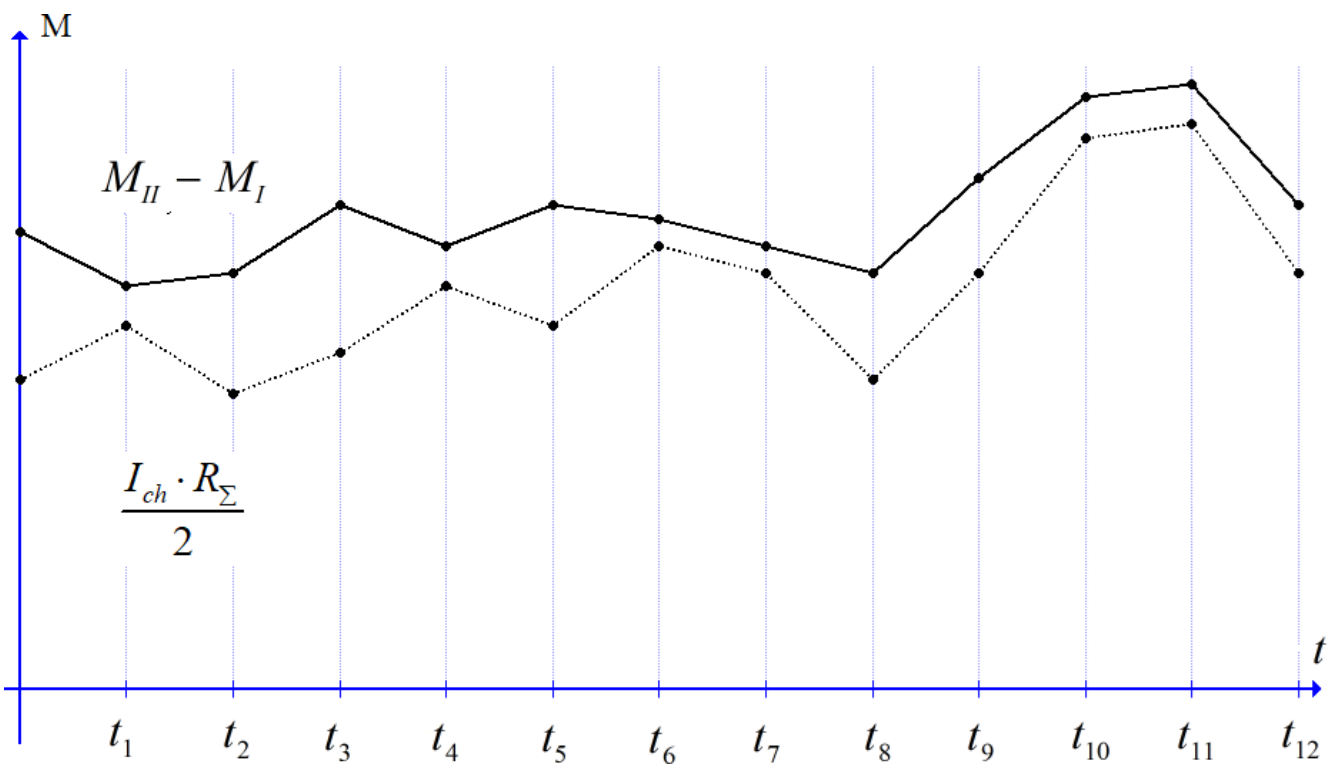


Рисунок 2.8 - Прогноз зміни параметрів режиму (індикативних показників) за умов використанням СНЕ

Такими діями можуть бути: обмеження генерації з боку відновлюваних розподілених джерел генерації, відповідне використання (за наявності) керованих локальних джерел генерації, керування навантаженням споживачів та використання систем накопичення енергії. Остання опція викликає особливий інтерес, враховуючи сучасні тенденції широкого справдження систем накопичення енергії та їхнього багатофункціонального використання.

3 ВИКОРИСТАННЯ СИСТЕМ НАКОПИЧЕННЯ ЕНЕРГІЇ ПРИ ВИРІШЕНІ ЗАДАЧ РЕГУЛЮВАННЯ НАПРУГИ В РОЗПОДІЛЬНИХ МЕРЕЖАХ

Якість електричної енергії характеризується низкою показників. ДРГ потенційно можуть впливати практично на будь-який з них, але найбільший інтерес тут становлять відхилення, коливання та провали, напруги, її гармонійні спотворення. Слід зазначити, що ДРГ практично завжди призводять до підвищення напруги в мережі. Цей ефект може бути позитивним для режиму максимальних навантажень, але, в той же час, може негативно вплинути на режим напруги при мінімальних навантаженнях.

При цьому більша частина ВДЕ, що інтегруються в розподільні мережі як ДРГ, характеризується накладенням випадковості та нестабільності генерованої вихідної потужності, що може викликати не тільки різкі коливання напруги у вузлах мережі, але й через розбіжність у часі періодів максимуму генерації та максимального електроспоживання, у багатьох випадках, до суттєвої зміни поточного розподілу в окремих розподільних лініях по відношенню до режиму роботи основної маси споживачів, які отримують живлення від шин підстанції.

Крім цього, ДРГ можуть порушити коректну роботу регуляторів напруги. Зміна швидкості вітру або сонячної радіації призводить до зміни вихідної потужності ДРГ, а, відповідно, і режиму напруг, що може призвести до безперервного спрацювання РПН трансформатора, що, по суті, викликає коливання напруги, в той час як самі собою зміни вихідної потужності генеруючих джерел не створюють скільки-небудь істотної зміни напруги.

Все це разом із існуючою системою централізованого регулювання напруги може серйозно вплинути на якість електроенергії на шинах електроприймачів [39].

У традиційних розподільних мережах тільки оператор системи має всі

ресурси, пов'язані з управлінням їх режимами. В активних мережах деякі засоби управління належать споживачеві, але мають бути залучені до управління режимами. Питання у тому, як це може бути реалізовано найефективніше.

В даний час РГ у більшості випадків розглядається як негативне навантаження і при плануванні аналізуються, як правило, тільки два граничні режими: максимальна генерація/мінімальне навантаження та мінімальна генерація/максимальне навантаження. Хоча ці умови, в принципі, визначають можливість роботи мережі за будь-яких поєднань генерація/навантаження, але не можуть бути застосовані, наприклад, для порівняльної оцінки різних стратегій управління режимами.

У зв'язку з цим існує необхідність у створенні нової процедури планування режимів, яка б порівнювати загальні витрати, зокрема, на альтернативні стратегії регулювання напруги.

Можливість впливу на рівні напруг в активних розподільних мережах розглядалося у багатьох дослідженнях, які можна розділити на кілька основних груп:

- 1) зміна регулювальних відгалужень розподільних трансформаторів;
- 2) зміна закону регулювання напруги на живлячий підстанції;
- 3) встановлення пристроїв компенсації реактивної потужності;
- 4) зміна потокорозподілу (як по активній, так і по реактивній потужності) в окремих розподільних лініях [40].

У загальному випадку, з метою забезпечення нормованих відхилень напруги можуть використовуватися такі конкретні технічні рішення:

- збільшення перерізу ліній;
- підключення ДРГ на виділений фідер;
- зміна відгалужень трансформаторів з ПБЗ;
- встановлення додаткових регуляторів напруги;

- створення можливості ДРГ споживати реактивну потужність;
- отримання можливості обмежувати видачу активної потужності з боку ДРГ;
- встановлення активних чи пасивних засобів компенсації реактивної потужності в лініях;
- управління навантаженням;
- використання накопичувачів енергії та його зарядка у режимах, коли має місце підвищення напруги.

При цьому такі рішення, як посилення мережі або підключення ДРГ на виділений фідер, може призвести до істотного подорожчання проектів впровадження РГ.

Вибір відгалужень трансформаторів із ПБЗ має враховувати всі можливі режими, оскільки. їх зміна можлива не частіше 1-2 разів на рік.

Зміна напруги на підстанції торкається всіх споживачів. Лінійні регулятори напруги змінюють рівні напруги локально (на ділянках мережі, які розташовані за цим пристроєм).

Управління потоками активної та реактивної потужності може бути реалізовано за рахунок використання різних ресурсів: генератори, компенсуючі пристрої, навантаження, системи накопичення енергії.

У цьому контексті окремий інтерес представляє можливість використання потенціалу СНЕ з метою цілеспрямованого впливу на режим напруг. [41 - 44]

Але, очевидно, що питання, пов'язані проблемою коливань напруги, що виникають, і тривалих змін режиму напруг, вимагатимуть різних підходів для свого вирішення.

Пристрій РПН, що реалізує закон регулювання напруги, передбачає завдання зони нечутливості (Δ). При цьому, якщо напруга на шинах підстанції вийшла за верхній припустимий рівень, пристрій автоматики після невеликої

витримки часу повинен видати сигнал на перемикання регулювального відгалуження з метою зниження напруги. Аналогічно, якщо напруга перебуває нижче нижньої припустимої границі, автоматично формується сигнал на підвищення напруги. Якщо ж напруга перебуває в межах зони нечутливості (Δ), то регулятор не повинен генерувати сигнал на зміну рівня напруги.

Вибір зони нечутливості є важливим і складним завданням. Неправильний вибір даної зони може або реалізувати занадто "грубе" регулювання напруги, що фактично не дозволить забезпечити припустимі відхилення напруги у значного числа споживачів. Надто вузька зона нечутливості може призвести до занадто частого й невиправданого спрацьовування регулюючого пристрою. З огляду на це, в окремих випадках для практичної реалізації подібного завдання спочатку задаються прийнятним числом спрацьовувань регулятора, наприклад, за добу й виходячи вже із цих умов обчислюють зону нечутливості. У багатьох випадках для розв'язання даного завдання використовується метод імовірнісного моделювання Монте Карло.

Для підвищення ефективності регулювання, зона нечутливості поділяється на дві частини (Рис. 3.9): внутрішню ($\Delta_{\text{в}}$) і зовнішню ($\Delta_{\text{з}}$). У цьому випадку зміна рівнів напруги відбувається у відповідності з наступними правилами. Якщо рівні напруги більшою мірою перебувають у межах внутрішньої частини зони нечутливості - немає необхідності в зміні регулювальних відгалуджень трансформатора.

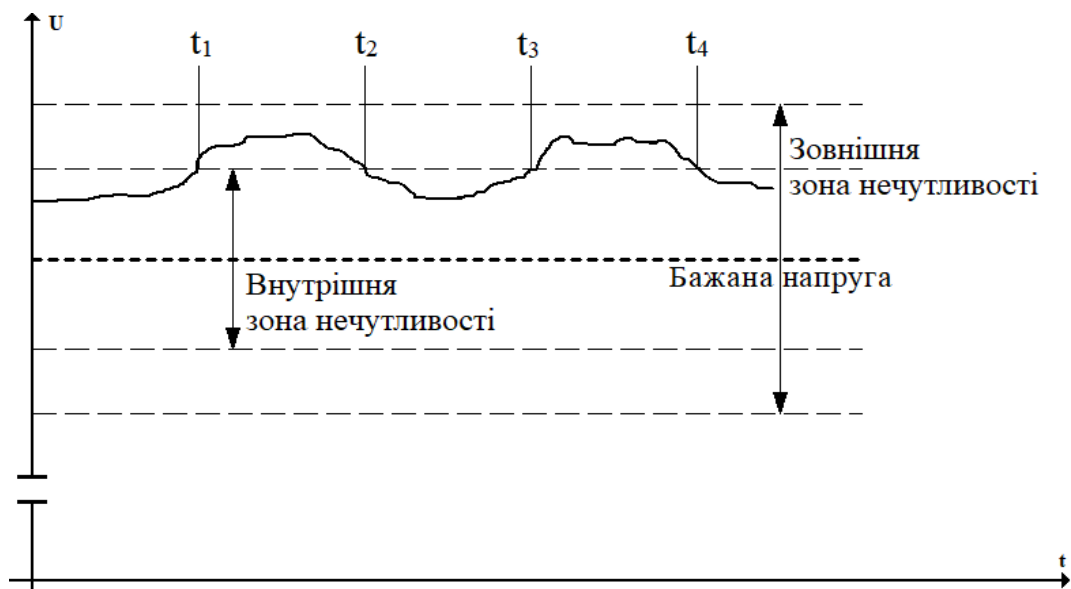


Рисунок 3.1 – Особливості регулювання напруги при наявності ДРГ в мережі

У випадку, коли напруга виходить за зовнішню границю зони нечутливості, зміна регулювального відгалуження трансформатора повинна здійснюватися негайно. Якщо напруга перебуває між границями внутрішньої й зовнішньої областей зони нечутливості, необхідно проаналізувати певну кількість послідовних вимірів напруги (цим ніби створюється витримка часу t_B – рис. 3.2) і тільки після цього ухвалювати рішення щодо перемиканні регулювальних відгалужень трансформатора.

Якщо час (t) протягом якого напруга перебуває між зовнішньою й внутрішньою границями зони нечутливості менше прийнятої витримки часу, перемикаючий пристрій не спрацьовує.

Реле витримки часу може використовувати залежну або зворотнозалежну характеристику. При використанні зворотнозалежної характеристики, витримка часу обернено пропорційна різниці між виміряною (фактичною) і бажаною (еталонною) напругою.

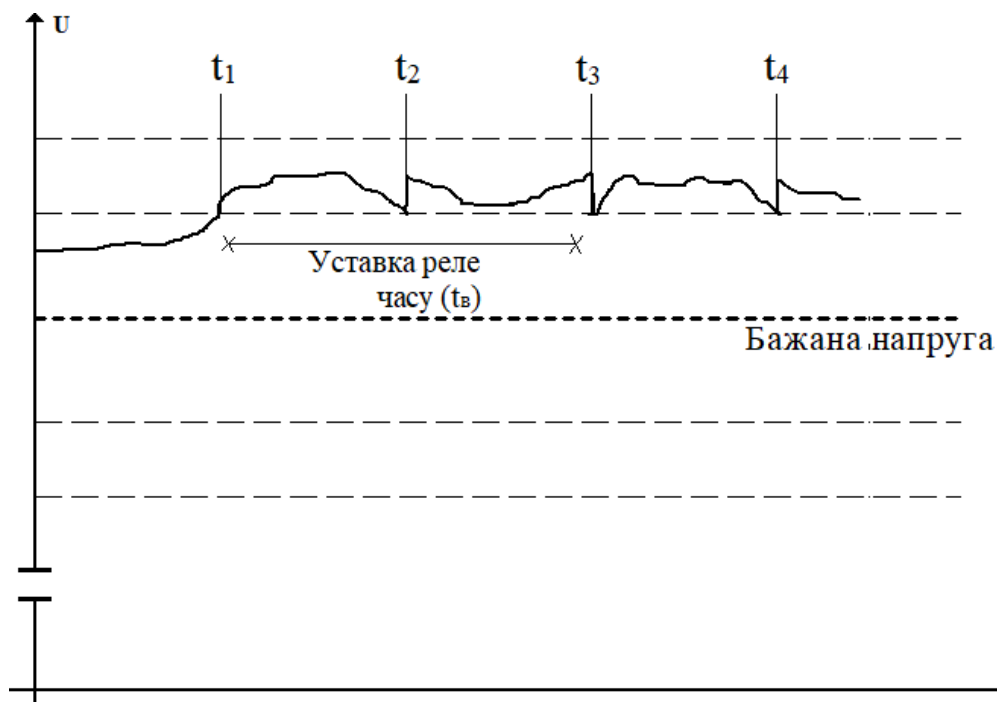


Рисунок 3.2 – Регулювання напруги шляхом використання СНЕ Така

стратегія реалізації принципів зустрічного регулювання напруги, безумовно, загрублює процес регулювання, але певною мірою встановлює баланс між вимогою дотримання допустимих відхилень напруги та використанням комутаційного ресурсу перемикачів РПН трансформаторів. Очевидно, що чим ширша зона нечутливості і більше інтервал витримки часу, тим менше перемикань (комутацій) здійснюється пристроєм РПН, але більшою мірою відрізняться рівень напруги, що підтримується на шинах підстанції, від його необхідного (бажаного) значення. Це може призвести до відхилень напруги, що виходять за допустимі межі.

Ситуація ускладнюється з появою у мережі локальних відновлюваних джерел енергії. У зв'язку з постійною флуктуацією вихідної потужності подібних джерел може виникнути ситуація, коли вимоги до зміни рівня напруги на підстанції постійно будуть змінюватися, однак це буде відбуватися на досить коротких проміжках часу (менших, ніж задана уставка спрацьовування реле часу).

Подібна ситуація представлена на рис. 3.9. У момент часу t_1 включається реле часу, але в момент часу t_2 у зв'язку зі зниженням навантаження на

трансформаторі реле відключається. Аналогічна ситуація повторюється на моменти часу t_3 і t_4 тощо. При цьому інтервали часу $t_2 - t_1$ і $t_4 - t_3$ менші, ніж уставка реле часу, що не дає можливість реалізувати команду зміни регулювальних відгалуження пристрою РПН трансформатора. Результатом може бути зниження якості електричної енергії, що постачається споживачам.

Ситуацію можна виправити за рахунок відповідного використання СНЕ. Так, зокрема, робота СНЕ у періоди часу $t_2...t_3$ у режимі зарядки дозволить збільшити навантаження на шинах трансформатора, що, відповідно до закону регулювання напруги, потребуватиме збільшення напруги на підстанції (рис. 3.10). Цим буде забезпечена доцільність збільшення напруги (відповідного зміни регулювальних відгалужень пристрою РПН трансформатора) на інтервалі часу $t_1 ... t_4$. Тим самим буде створено умови для забезпечення нормованих відхилень напруги. При цьому зарядна потужність СНЕ може бути як постійною, так і змінною у межах відповідних інтервалів часу.

Ще складніша ситуація складається при різких (але відносно короткострокових) змінах потужності ДРГ (рис. 3.3).

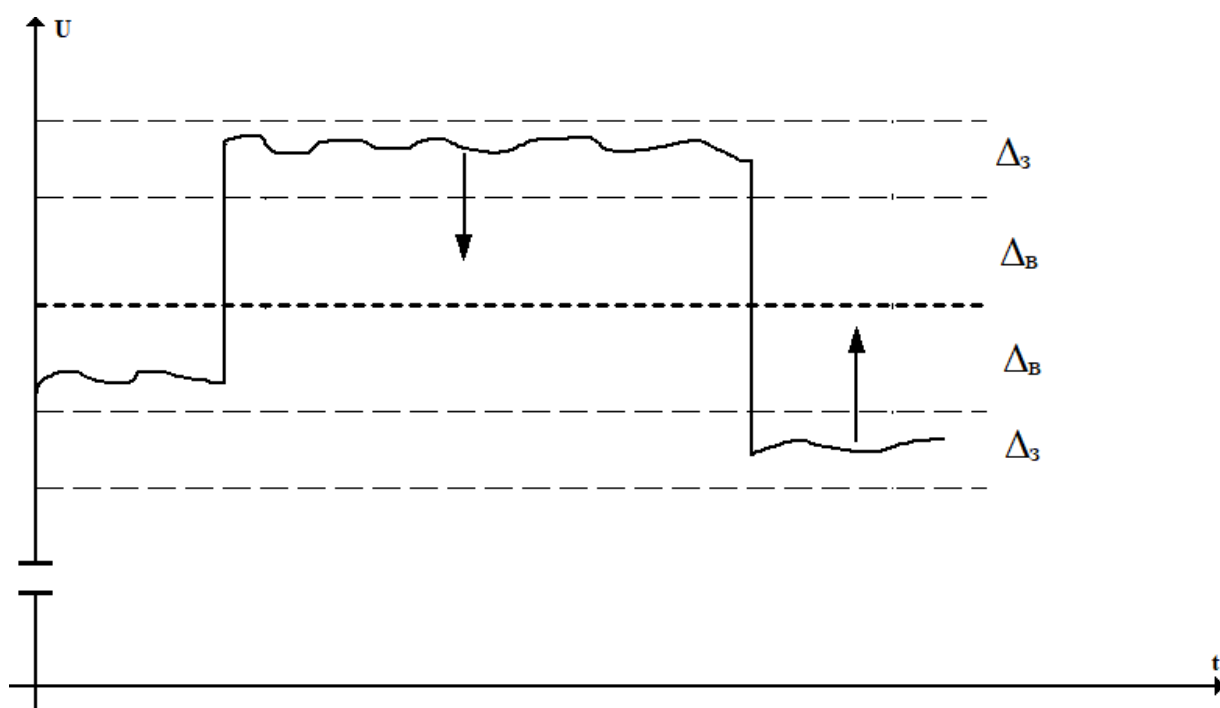


Рисунок 3.3 – Випадок різкої зміни потужності ДРГ

Очевидно, що в такій ситуації постійно формуватимуться команди на різноспрямовану зміну регулювальних відгалужень пристрою РПН трансформатора, що призведе або до прискореного вичерпання його комутаційного ресурсу, або вимагатиме збільшення зони нечутливості. Будь-яке з зазначених рішень матиме негативні техніко-економічні наслідки.

Альтернативним варіантом також може бути відповідне застосування СНЕ (рис. 3.4).

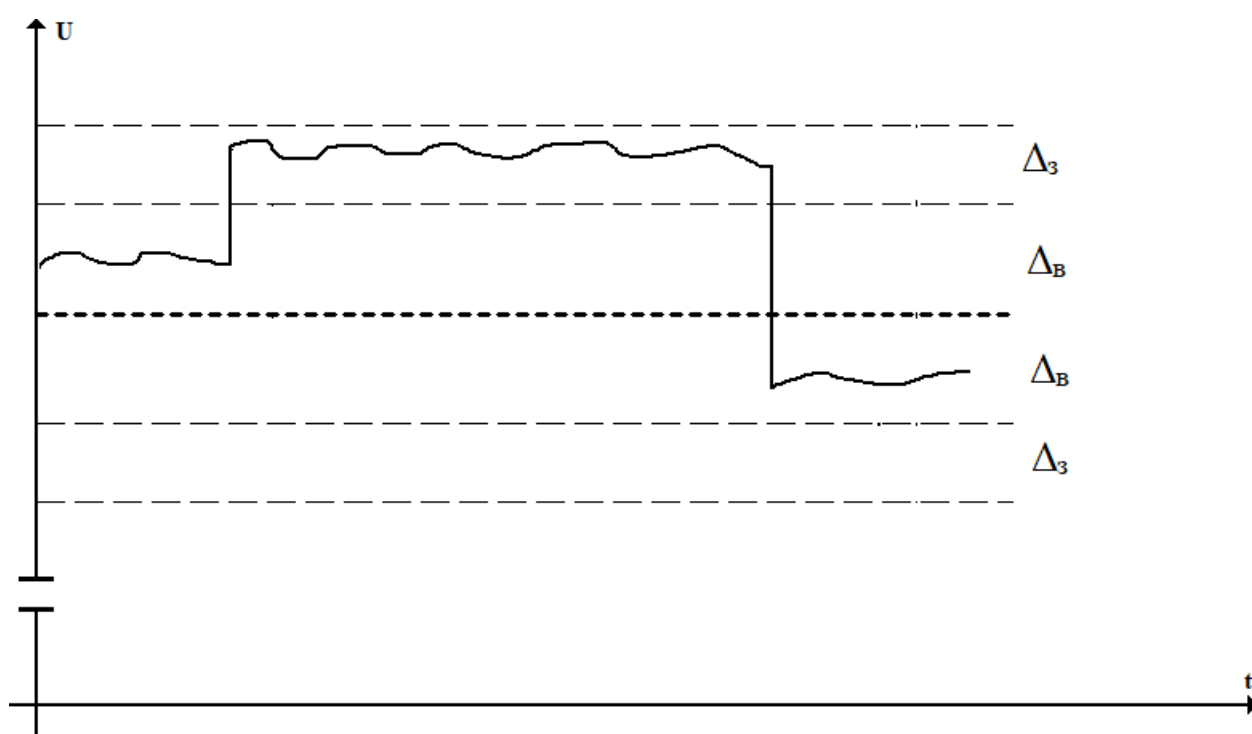


Рисунок 3.4 – Застосування СНЕ при різких змінах потужності ДРГ

Висновки до розділу 3

1. Проаналізовано доцільність використання систем накопичення енергії для планування та управління режимами роботи розподільних мереж. Запропоновано підхід на основі використання індикативного показника для вирішення завдань мінімізації втрат потужності шляхом оцінки доцільності зміни топології контуру розподільної мережі. Даний підхід є достатньо

ефективним і дозволяє реалізувати функціональні можливості СНЕ.

2. Використання СНЕ для вирішення задач регулювання напруги є одним з перспективних застосувань технологій накопичення. СНЕ дозволить збільшувати або зменшувати навантаження, цим самим, відповідно до закону регулювання напруги збільшувати або зменшувати напругу на підстанції.

4. ОХОРОНА ПРАЦІ

У цьому розділі бакалаврської кваліфікаційної роботи розробляються заходи з охорони праці в процесі обслуговування електричної підстанції. Отже, на оперативно-ремонтний персонал, що здійснює експлуатацію обладнання підстанції, впливають такі шкідливі виробничі фактори [1, 2]: фізичні фактори: мікроклімат (температура, вологість, швидкість руху повітря, інфрачервоне випромінювання); виробничий шум, ультразвук, інфразвук; вібрація (локальна, загальна); освітлення: природне (недостатність), штучне (недостатня освітленість, прямий і відбитий сліпучий відблиск тощо); хімічні фактори: речовини хімічного походження, аерозолі фіброгенної дії (пил); фактори трудового процесу: важкість (тяжкість) праці; напруженість праці. Важкість праці характеризується рівнем загальних енергозатрат організму або фізичним динамічним навантаженням, масою вантажу, що піднімається і переміщується, загальною кількістю стереотипних робочих рухів, величиною статичного навантаження, робочою позою, переміщенням у просторі. Напруженість праці характеризують: інтелектуальні, сенсорні, емоційні навантаження, ступінь монотонності навантажень, режим роботи.

4.1 Технічні рішення з безпечної експлуатації об'єкту

Технічні рішення з безпечної організації робочих місць

Роботи в діючих електроустановках слід проводити за нарядом, розпорядженням та в порядку поточної експлуатації. Роботи, які виконують в порядку поточної експлуатації працівники на закріплених за ними електроустановках, проводять без оформлення наряду або розпорядження. Перелік робіт, які виконують у порядку поточної експлуатації, затверджує керівництво підприємства. За нарядами слід виконувати всі роботи, які не ввійшли до переліку робіт, що виконуються в порядку поточної експлуатації та за розпорядженням.

Забороняється самовільне проведення робіт, а також розширення робочих місць та обсягу завдання, визначених нарядом або розпорядженням.

Виконання робіт в електроустановках в зоні дії іншого наряду слід

узгоджувати з працівником, який видав попередній наряд. Узгодження оформлюється до підготовки робочого місця записом на полях наряду (біля таблиці 2) "Узгоджено" та за підписом працівника, який узгоджує.

Ремонт електроустановок із застосуванням вантажопідіймальних машин, механізмів або великогабаритних пристроїв, за винятком ямобурів і телескопічних пристроїв для піднімання людей, слід виконувати за технологічними картами або ППР.

В електроустановках до 1000 В електростанцій, підстанцій і на КЛ під час виконання роботи під напругою необхідно:

- відгородити розташовані поблизу робочого місця струмопровідні частини, що перебувають під напругою, до яких можливий випадковий дотик;
- працювати в діелектричних калошах, ботах або стоячи на ізолювальній підставці чи на гумовому діелектричному килимку;
- застосовувати інструмент з ізолювальними рукоятками (у викруток повинен бути ізолюваний стрижень). У разі відсутності такого інструменту слід користуватись діелектричними рукавичками.

Забороняється працювати в одязі з короткими або закоченими рукавами, користуватись ножівками, металевими метрами тощо.

В електроустановках понад 1000 В під час проведення робіт на струмопровідних частинах, що перебувають під напругою, за допомогою захисних ізолювальних засобів необхідно:

- користуватись тільки випробуваними сухими та чистими ізолювальними засобами з непошкодженим лаковим покриттям;
- тримати ізолювальні засоби за ручки-захвати не далі обмежувального кільця;
- розмістити ізолювальні засоби так, щоб не виникала небезпека перекриття між фазами або фази на землю.

Під час виконання роботи із застосуванням електрозахисних засобів (ізолювальні штанги, електровимірювальні штанги та кліщі, покажчики напруги) допускається наближатись людині до струмопровідних частин на відстань, визначену довжиною їхньої ізолювальної частини.

Забороняється в електроустановках працювати в зігнутому положенні, якщо у разі випрямлення відстань до струмопровідних частин буде менша за зазначену в інструкціях з ОП. Забороняється в електроустановках електростанцій та підстанцій 6-110 кВ під час роботи біля неогороджених струмопровідних частин розміщуватись так, щоб вони були позаду або з обох боків.

На ПЛ, за винятком зовнішніх введів 0,4 кВ до будівель, та ПЛЗ перед розриванням або з'єднанням електрично сполучених складників (проводів, тросів) необхідно встановлювати заземлення з обох боків розриву (передбачуваного розриву).

В темний період доби ділянки робіт, робочі місця, проїзди і підходи до них слід освітлювати. Забороняється працювати в неосвітлених місцях.

У випадку наближення грози слід припинити всі роботи на ПЛ, ПЛЗ; у ВРУ, ЗРУ на виводах та лінійних роз'єднувачах ПЛ; на КЛ, під'єднаних до ділянок ПЛ, а також на вводах ПЛЗ в приміщеннях вузлів зв'язку та на антенно-щоголових спорудах.

Всі працівники, які перебувають в діючих електроустановках (за винятком щитів керування, приміщень з релейними панелями та їм подібних), в колодязях, тунелях, траншеях, повинні користуватись захисними касками.

Працівникам підприємств, інших організацій, направлених у відрядження, одноособово можна записувати покази лічильників та інших вимірювальних приладів, встановлених на щитах керування і в РУ. У разі наявності місцевих оперативних працівників відряджені працівники повинні мати групу II, а у разі відсутності місцевих оперативних працівників - групу III. Працівники, які обслуговують компресорні установки та повітрозбірники, електролізні установки, акумуляторні батареї та зарядні пристрої, повинні мати групу III.

Електробезпека

Основні технічні рішення щодо запобігання електротравмам:

- 1) виконання технічних заходів під час підготовки робочого місця,
- 2) застосування під час обслуговування електроустановок електрозахисних засобів.

- 1) Під час підготовки робочого місця для роботи, яка вимагає знімання

напруги, слід виконати у зазначеній послідовності такі технічні заходи:

- провести необхідні вимкнення і вжити заходів щодо запобігання помилковому або самочинному вмиканню комутаційної апаратури;
- вивісити заборонні плакати на приводах ручного і на ключах дистанційного керування комутаційної апаратури. За необхідності струмопровідні частини слід огорожувати;
- приєднати до "землі" переносні заземлення;
- перевірити відсутність напруги на струмопровідних частинах, на які слід встановити заземлення. Якщо переносні заземлення планується ставити поблизу струмопровідних частин, що не входять в зону робочого місця, то їх огороження слід встановити до перевірки відсутності напруги та заземлення;
- встановити заземлення (увімкнути заземлювальні ножі, приєднати до вимкнених струмопровідних частин переносні заземлення) безпосередньо після перевірки відсутності напруги та вивісити плакати "Заземлено" на приводах вимикальних комутаційних апаратів;
- огородити, у разі необхідності, робочі місця або струмопровідні частини, що залишились під напругою, і вивісити на огороженнях плакати безпеки. Залежно від місцевих умов струмопровідні частини огорожують до або після їх заземлення.

2) Під час обслуговування електроустановок повинні застосовуватись засоби захисту від ураження електричним струмом, від впливу електричного поля, а також засоби індивідуального та колективного захисту. Ізолювальні електрозахисні засоби поділяються на основні і додаткові. До основних ізолювальних електрозахисних засобів, які повинні застосовуватись в електроустановках напругою понад 1000 В, відносяться: ізолювальні штанги всіх видів, ізолювальні кліщі, електровимірювальні кліщі, покажчики напруги, пристрої для створення безпечних умов праці під час проведення випробувань і вимірювань в електроустановках (покажчики напруги для фазування, покажчики пошкодження кабелів та ін.); до додаткових – діелектричні рукавички, діелектричне взуття, діелектричні килими, ізолювальні підставки, ізолювальні накладки, ізолювальні ковпаки, штанги для перенесення та вирівнювання

потенціалу, сигналізатори напруги, захисні огороження (щити, ширми), переносні заземлення, плакати та знаки безпеки та інші засоби захисту.

Крім наведених вище засобів захисту в електроустановках повинні застосовуватись такі ЗІЗ: захисні каски – для захисту голови; захисні окуляри і щитки – для захисту очей і обличчя; протигази і респіратори – для захисту органів дихання; рукавиці – для захисту рук; запобіжні пояси та страхувальні канати.

Вибір необхідних електрозахисних засобів, засобів захисту від дії ЕП, а також ЗІЗ регламентується [3], а також іншими відповідними нормативними документами (НД) з урахуванням місцевих умов. У разі застосування основних ізолювальних електрозахисних засобів достатньо використовувати один додатковий засіб, крім випадків, що обумовлені в цих Правилах. У разі необхідності захисту працівника від напруги кроку дозволяється використовувати діелектричне взуття без застосування основних засобів захисту.

За безпечність конструкції, правильність вибору матеріалів, якість виготовлення, а також за відповідність засобів захисту чинним в Україні нормативним документам повинні нести відповідальність керівники підприємств, установ, організацій (незалежно від форми власності), що виготовляють ці засоби захисту, орган, який видав сертифікат на виробництво та на реалізацію захисних засобів, в тому числі і засобів захисту зарубіжного виробництва.

4.2. Технічні рішення з гігієни праці і виробничої санітарії

Мікроклімат

Тяжкість роботи розділяється на категорії залежно від загальних енерговитрат організму, ккал/с (Вт). Параметри мікроклімату в виробничому приміщенні, де встановлена лінія, наведено в таблиці 4.1.

Для забезпечення необхідних за нормативами параметрів мікроклімату на робочому місці технологічного персоналу передбачається:

- в холодну пору року використання калорифера;
- в літню пору застосування вентиляторів обдува;
- провітрювання приміщення.

Таблиця 4.1 – Нормування параметрів мікроклімату на непостійних робочих місцях

Період року	Категорія робіт	Температура, °С	Відносна вологість	Швидкість руху
Теплий	Пб	15-29	70 при 25°С	0,2-0,5
Холодний	Пб	13-23	не більш 75	не більш 0,4

Склад повітря робочої зони

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

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

Назва речовини	ГДК, мг/м ³		Клас небезпечності
	Максимально разова	Середньо добова	
Пил нетоксичний	0.5	0.15	4
Вуглець (II) оксиду	20		4

Для забезпечення складу повітря робочої зони передбачено:

- провітрювання приміщення;
- цілісність вікон для перешкоджання попадання пилу в приміщення під час роботи лінії;
- встановлення пиловловлюючих засобів.

Виробниче освітлення

Характеристика зорових робіт під час експлуатації електрообладнання – малої точності. Відповідно до ДБН В.2.5-28-2018 розряд зорової роботи IV, підрозряд «Г».

Таблиця 4.3 – Вимоги до освітлення приміщень виробничих підприємств

Х-ка зорової роботи	Найменший або еквівалентний розмір об'єкта розрізнення, мм	Розряд зорової роботи	Під-розряд зорової роботи	Контраст об'єкта фоном	Х-ка фону	Штучне при системі комбінованого освітлення		Природне Ен пр	Сумісне Е сум
						всього	у т. ч. від загального		
Малої точності	Від 1,0 до 5 включно	V	г	середній великий великий	світлий світлий середній	-	200	3	1,8

При експлуатації здійснюється контроль за рівнем напруги освітлювальної мережі, своєчасна заміна перегорілих ламп, забезпечується чистота повітря у приміщенні.

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» (таблиця 4.4).

Таблиця 4.4 – Рівень звукового тиску

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

Проектом передбачені засоби колективного захисту: акустичні, архітектурно-планувальні й організаційно-технічні.

Засоби боротьби із шумом в залежності від числа осіб, для яких вони призначені, поділяються на засоби індивідуального захисту і на засоби

колективного захисту - «ССБТ. Засоби індивідуального захисту органів слуху. Загальні технічні умови і методи випробувань» і «Засоби і методи захисту від шуму. Класифікація».

Для зниження шуму в приміщенні, необхідно:

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

4.3. Пожежна безпека

Пожежну безпеку промислових і інших об'єктів регламентують ССБТ «Пожежна безпека. Загальні вимоги». Типові правила пожежної безпеки для промислових підприємств і інструкції на окремих об'єктах.

Приміщення підстанції за вибухонебезпечністю та пожежонебезпечністю 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-ІІІ (місця, де зберігаються тверді горючі речовини). Будівля, в якій розташовані ці приміщення, характеризується ІІІ ступенем вогнестійкості.

До ІІІ 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 хвилинах) та максимальні межі поширення вогню по них (см) за ДБН В.1.1.7-2016 [15] наведено в таблиці 4.5.

Таблиця 4.5 – Мінімальні межі вогнестійкості будівельних конструкцій та максимальні межі поширення вогню по них

Ступінь вогнестійкості будинків	Мінімальні межі вогнестійкості будівельних конструкцій (у хвилинах) і максимальні межі поширення вогню по них (см)								
	стіни				коло-ни	сходові площад-ки, костури, сходи, балки, марші сходових кліток	пере-криття між по-верхові (у т.ч. горищні та над підва-лами	елементи суміщених покриттів	
	несучі та сходових кліток	само-несучі	зов-ніш-ні не-несу-чі	внут-рішні не-несучі (пере-город-ки				пли-ти, насти-ли, прого-ни	балки, ферми, арки, рами
III	REI 120 M0	REI 60 M0	E 15 M0	EI 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 3.6.

Таблиця 4.6 – Протипожежні перешкоди та мінімальні межі їх вогнестійкості

Протипожежні перешкоди	Типи проти-пожежних перешкод або їх елементів	Мінімальна межа вогнестійкості протипожежної перешкоди (у хвилинах)	Тип заповнен-ня прорізів, не нижче	Тип протипо-жежного тамбур-шлюзу, не нижче
Стіни	2	REI 60	2	1
Перегородки	2	EI 15	3	2
Перекриття	2	REI 60	2	1

Протипожежні відстані від житлових, громадських, адміністративно-побутових будинків промислових підприємств, гаражів до виробничих,

складських будинків і споруд слід приймати за таблицею 3.7 (знаменник).

Таблиця 4.7

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

Ступінь вогнестійкості будинку	Відстані при ступені вогнестійкості будинків, м		
	I, II	III	IIIa, IIIб, IV, IVa, V
III	8/9	8/12	10/15

Найбільшу відстань до евакуаційного виходу визначаємо за об'ємом приміщення та ступені вогнестійкості будівлі.

В приміщенні, відстань при щільності людського потоку в загальному проході, чол/м² наступна: до 1 – 100 м².

На території підстанції встановлено 12 вогнегасників ВП-5 [16].

ВИСНОВКИ

1. В бакалаврській кваліфікаційній роботі виконано дослідження існуючих технологій акумулювання електричної енергії в масштабі світового досвіду використання. Здійснений аналіз продемонстрував реальні перспективи широкого використання засобів акумулювання для вирішення задач в електроенергетичній галузі.

Виконаний аналіз дозволив оцінити перспективи використання СНЕ для вирішення завдань притаманним системам розподілу. Практичне застосування технологій накопичення дозволяє продемонструвати та порівняти їх технологічну зрілість, техніко-економічні та екологічні показники.

2. В роботі було розглянуто найбільш перспективні, з точки зору використання в розподільних мережах, технології накопичення електричної енергії. Кожна з них має свої переваги та недоліки, і вибір конкретної технології залежить від конкретних потреб та вимог системи електропостачання. Ванадієві батареї мають високу ефективність та довговічність, Li-ion батареї мають високу енергетичну щільність та довгий термін служби, механічні системи накопичення мають високу енергетичну щільність та швидкий відгук на зміни попиту, сірчано-натрієві батареї мають високу енергетичну щільність та можуть забезпечувати довготривале зберігання енергії, а суперконденсатори можуть забезпечувати високу потужність та швидкий заряд та розряд енергії.

3. Було проаналізовано доцільність використання СНЕ для планування та управління режимами роботи розподільних мереж. Розроблено підхід для вирішення задачі мінімізації втрат потужності шляхом оцінки доцільності зміни топології контуру розподільної мережі на основі використання індикативного показника.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Electrical energy storage, White paper, International Electrotechnical Commission, Geneva 2011, www.iec.ch
2. IEEE Std 1547.2-2008, IEEE Application Guide for IEEE Std 1547, IEEE Standard for Interconnecting Distributed Resources with Electric Power Systems, 2009
3. Erbach, G. (2019). Energy storage and sector coupling. EPRSj European Parliamentary Research Service.
4. China Energy Storage Alliance (CNESA). CNESA Global Energy Storage Market Analysis—2019.Q4 (Summary). 2020. Available online: <http://en.cnesa.org/latest-news/2020/5/28/cnesa-global-energy-storagemarket-analysis-2020q1-summary> (accessed on 15 October 2020).
5. Eurostat, 2021.
6. Schill, W.-P., & Zerrahn, A. (2018). Long-run power storage requirements for high shares of renewables: Results and sensitivities. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 83, 156–171. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.05.205>.
7. EASE-EERA recommendations for a Energy Storage Technology Development Roadmap.
8. Augustine, Chad, and Nate Blair. Energy Storage Futures Study: Storage Technology Modeling Input Data Report. Golden, CO: National Renewable Energy Laboratory. NREL/TP-5700-78694. <https://www.nrel.gov/docs/fy21osti/78694.pdf>.
9. Henok Ayele Behabtu, Maarten Messagie, Thierry Coosemans, Maitane Berecibar, Kinde Anlay Fante, Abraham Alem Kebede and Joeri Van Mierlo A Review of Energy Storage Technologies Application Potentials in Renewable Energy Sources Grid Integration, *Sustainability* **2020**, 12, 10511
10. U.S. Department of Energy Office of Scientific and Technical Information Available electronically at OSTI.gov <http://www.osti.gov>
11. Sandia National Laboratories: Exceptional Service in the National Interest. Sandia National Laboratories. URL: <https://www.sandia.gov/> (date of

access: 02.03.2023).

12. EASE-EERA recommendations for a Energy Storage Technology Development Roadmap.
13. US Department of energy: Global Energy Storage Database, 2016 http://www.energystorageexchange.org/projects/data_visualization
14. Sabihuddin, S.; Kiprakis, A.E.; Mueller, M. A numerical and graphical review of energy storage technologies. *Energies* 2015, 8, 172–216.
15. Luo, X.; Wang, J.; Dooner, M.; Clarke, J. Overview of current development in electrical energy storage technologies and the application potential in power system operation. *Appl. Energy* 2015, 137, 511–536.
16. Rohit, A.K.; Rangnekar, S. An overview of energy storage and its importance in Indian renewable energy sector: Part II—Energy storage applications, benefits and market potential. *J. Energy Storage* 2017, 13, 447–456.
17. Chen, H.; Cong, T.N.; Yang, W.; Tan, C.; Li, Y.; Ding, Y. Progress in electrical energy storage system: A critical review. *Prog. Nat. Sci.* 2009, 19, 291–312.
18. Nadeem, F.; Hussain, S.M.S.; Tiwari, P.K.; Goswami, A.K.; Ustun, T.S. Comparative review of energy storage systems, their roles, and impacts on future power systems. *IEEE Access* 2019, 7, 4555–4585.
19. Maisanam, A.K.S.; Biswas, A.; Sharma, K.K. An innovative framework for electrical energy storage system selection for remote area electrification with renewable energy system: Case of a remote village in India. *J. Renew. Sustain. Energy* 2020, 12.
20. Aneke, M.; Wang, M. Energy storage technologies and real life applications—A state of the art review. *Appl. Energy* 2016, 179, 350–377.
21. Ben Elghali, S.; Outbib, R.; Benbouzid, M. Selecting and optimal sizing of hybridized energy storage systems for tidal energy integration into power grid. *J. Mod. Power Syst. Clean Energy* 2019, 7, 113–122.
22. IEC. IEC Electrical Energy Storage White Paper. 2009. Available online: <https://www.iec.ch/whitepaper/>.
23. Handbook of Energy Storage for Transmission or Distribution

Applications, EPRI, Palo Alto, 2002, 300 p.

24. Vanadium Redox Flow Batteries An In-Depth Analysis, EPRI, Palo Alto, 2007, 102 p

25. Applications of Lithium-Ion Batteries in Grid-Scale Energy Storage Systems - Transactions of Tianjin University. (б. д.). SpringerLink. <https://link.springer.com/article/10.1007/s12209-020-00236-w>

26. Electric Energy Storage Technology Options: A White Paper Primer on Applications, Costs, and Benefits. EPRI, Palo Alto, CA, 2010, 170 p.

27. Pavlo Nicolaidis, 2017

28. Courtesy Of Piller Premium PowerSystem] [Handbook of Energy Storage for Transmission or Distribution Applications, EPRI, Palo Alto, CA: 2002. 300 p.

29. Amiryar, Mustafa E., Pullen, Keith R., 2017. A review of flywheel energy storage system technologies and their applications. Appl. Sci. 7, pp. 1–21.

30. H. Kamath, J-M. Tarascon B. Dunn, "Electrical Energy Storage for Grid: A battery of choices," *Science*, vol. 334, no. 1, p. 928, Nov. 2011.

31. Zahrul F. Hussien¹, Lee W. Cheung¹, Mohd F. M. Siam and Amir B. Ismail¹ Modeling of Sodium Sulfur Battery for Power System Applications/ ELEKTRIKA, 9(2), 2007, pp. 66-72

32. Yves Brunet Energy storage, Wiley-ISTE; 1st edition, 2010, 272 p.

33. Ander González, Eider Goikolea, Jon Andoni Barrena, Roman Mysyk Review on supercapacitors: Technologies and materials, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 58, (2016), pp.1189–1206/

34. Amin M. Saleem, Vincent Desmaris, and Peter Enoksson Performance Enhancement of Carbon Nanomaterials for Supercapacitors Hindawi Publishing Corporation Journal of Nanomaterials Volume 2016, Article ID 1537269, 17 p, <http://dx.doi.org/10.1155/2016/1537269>

35. Kasun Subasinghage, Kosala Gunawardane, Nisitha Padmawansa, Nihal Kularatna and Mehdi Moradian Modern Supercapacitors Technologies and Their Applicability in Mature Electrical Engineering Applications, Energies, 2022, 15, 7752, 16 p.

36. Popov, V., Tkachenko, V., Yarmoliuk, O., Yatsenko, D. (2023). Actual Trends of Electrical Distribution Systems Automation. In: Kyrylenko, O., Denysiuk, S., Derevianko, D., Blinov, I., Zaitsev, I., Zaporozhets, A. (eds) Power Systems Research and Operation. Studies in Systems, Decision and Control, vol 220. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-17554-1_14 Print ISBN978-3-031-17553-4 Online ISBN978-3-031-17554-1
37. Жаркін А.Ф., Новський В.А., Ярмолюк О.С., Хавкар Ахмед Нурі Огляд технологій керування режимами електричних мереж напругою 6...20 кВ з розосередженими джерелами енергії, Електронне моделювання. 2021. Т. 43. № 1. С. 46-66.
38. Fan J.Y. A real-time implementation of short – term load forecasting for distribution power systems / J.Y. Fan, J.D. McDonald // IEEE Transactions on Power Systems, 1994, 9, pp. 988 – 994.], [Sobri, S.; Koohi-Kamali, S.; Rahim, N.A. Solar photovoltaic generation forecasting methods: A review. Energy Convers. Manag. 2018, 156, 459–497.
39. Jung, J., Onen, A., Arghandeh, R., and Broadwater, R. P. (2014). Coordinated control of automated devices and photovoltaic generators for voltage rise mitigation in power distribution circuits. Renew. Energy 66, 532–540. doi:10.1016/j.renene.2013.12.039], [Watson, J. D., Watson, N. R., Santos-Martin, D., Wood, A. R., Lemon, S., and Miller, A. J. V. (2016). Impact of solar photovoltaics on the low-voltage distribution network in New Zealand. IET Gener. Transm. Distrib. 10 (1), 1–9. doi:10.1049/iet-gtd.2014.1076
40. Hasheminamin, M., Agelidis, V. G., Ahmadi, A., Siano, P., and Teodorescu, R. (2018). Single-point reactive power control method on voltage rise mitigation in residential networks with high PV penetration. Renew. Energy 119, 504–512. doi:10.1016/j.renene.2017.12.029
41. Fan, F., Zorzi, G., Campos-Gaona, D., Burt, G., Anaya-Lara, O., Nwobu, J., et al. (2021). Sizing and coordination strategies of battery energy storage system collocated with wind farm: the UK perspective. Energies 14 (5), 1439. doi:10.3390/en14051439
42. ДСНіП «Гігієнічна класифікація праці за показниками шкідливості

та небезпечності факторів виробничого середовища, важкості та напруженості трудового процесу». Наказ МОЗ № 248 від 08.04.2014.

43. ДСТУ-Н Б А 3.2-1: 2007 Настанова щодо визначення небезпечних і шкідливих факторів та захисту від їх впливу при виробництві будівельних матеріалів і виробів та їх використання в процесі зведення та експлуатації об'єктів будівництва. URL: <https://profidom.com.ua/a-3/a-3-2/824-dstu-n-b-a-3-2-12007-nastanova-shhodo-viznachenna-nebezpechnih-i-shkidlivih-faktoriv->.

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

45. 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.

46. 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>.

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

48.

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

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

50. 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>.

51. ДСН 3.3.6.039-99. Державні санітарні норми виробничої загальної та локальної вібрації. URL: <http://zakon2.rada.gov.ua/rada/show/va039282-99>.

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

- 53.. ДСТУ 8828:2019 Пожежна безпека. Загальні положення. URL: <https://dwg.ru/dnl/15125>.
54. . 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>.
- 55.. 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.
56. 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.
57. 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>.
58. Cheng, P., Zhou, Y., Song, Z., and Qu, Y. (2016). “Modeling and SOC estimation of LiFePO₄ battery,” in International conference on robotics and biomimetics (ROBIO), Qingdao, China, December 3–7, 2016 (Qingdao, China: IEEE), 2140–2144
59. Atwa, Y. M., El-Saadany, E. F., Salama, M. M. A., and Seethapathy, R. (2010). Optimal renewable resources mix for distribution system energy loss minimization. IEEE Trans. Power Syst. 25 (1), 360–370. doi:10.1109/tpwrs.2009.2030276
60. Teng, J.-H., Luan, S.-W., Lee, D.-J., and Huang, Y.-Q. (2013). Optimal charging/discharging scheduling of battery storage systems for distribution systems interconnected with sizeable PV generation systems. IEEE Trans. Power Syst. 28 (2), 1425–1433. doi:10.1109/tpwrs.2012.2230276

ПРОТОКОЛ ПЕРЕВІРКИ НАВЧАЛЬНОЇ (КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ) РОБОТИ

Назва роботи: «Аналіз ефективності використання систем накопичення енергії в мережах»

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 Лесько В. О.

(прізвище, ініціали, посада)

Показники звіту подібності

StrikePlagiarism	
Оригінальність	85,96
Загальна схожість	14,04

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 БК
(підпис)

Костенко Б.О.
(прізвище, ініціали)

Опис прийнятого рішення

Робота допущена до захисту

Особа, відповідальна за перевірку

(підпис)

Вишневський С.Я

(прізвище, ініціали)

Експерт

(за потреби)

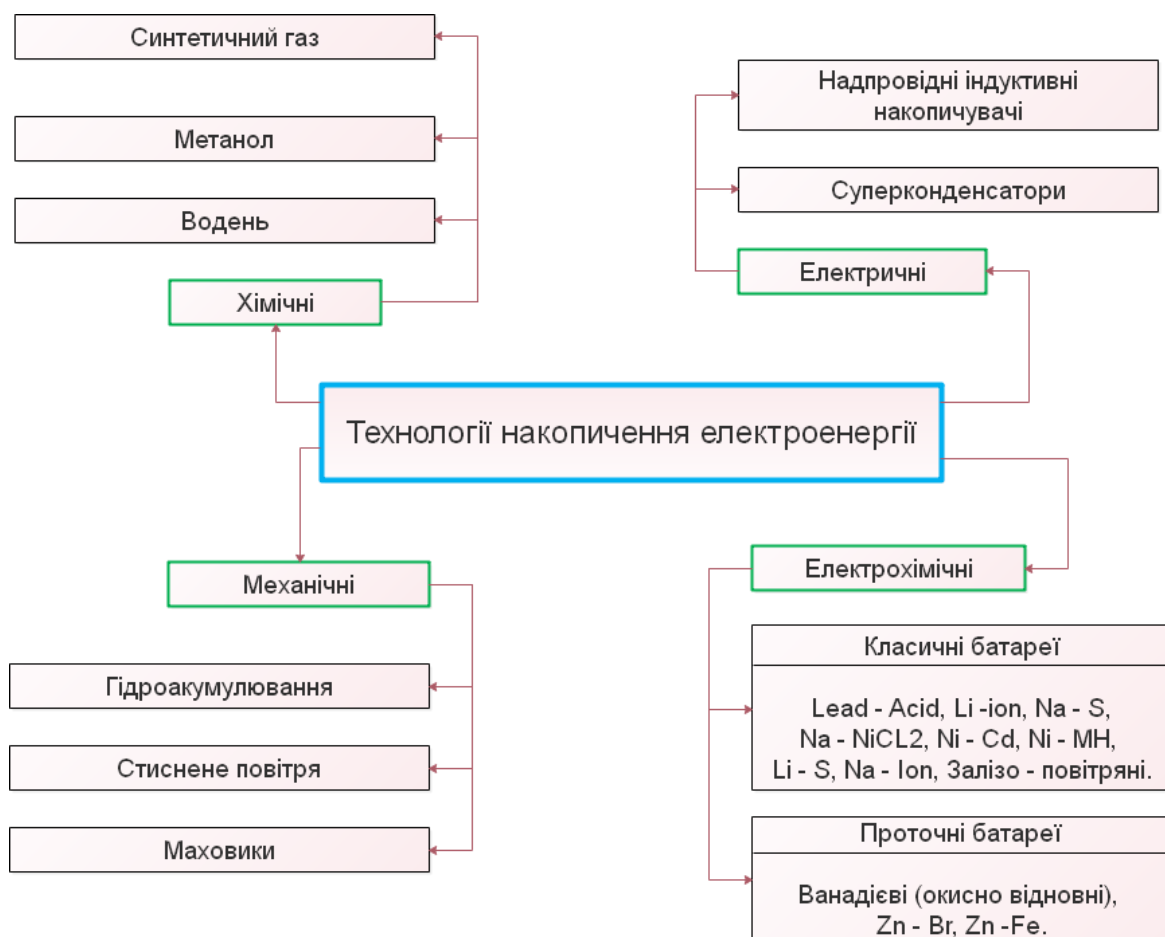
(підпис)

(прізвище, ініціали, посада)

Додаток Б

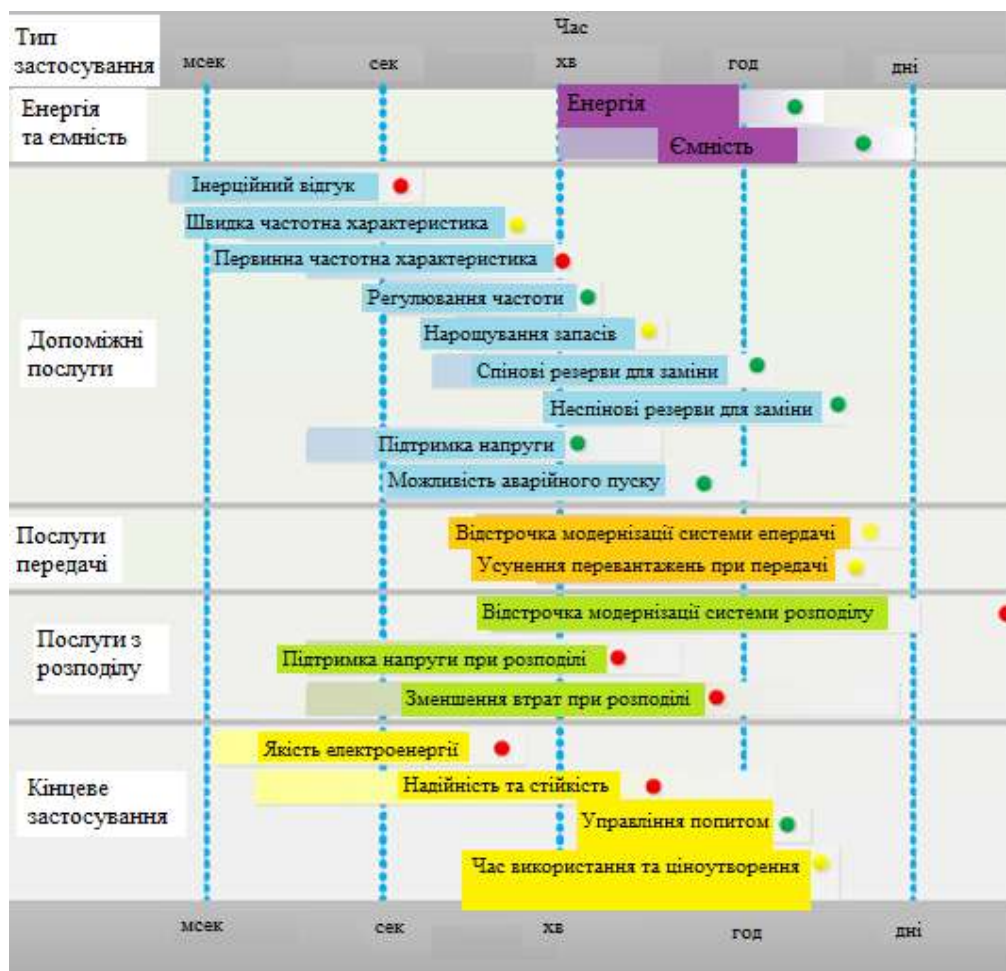
Ілюстративна частина

Основні групи технологій акумулювання енергії, орієнтованих на електроенергетичний сектор

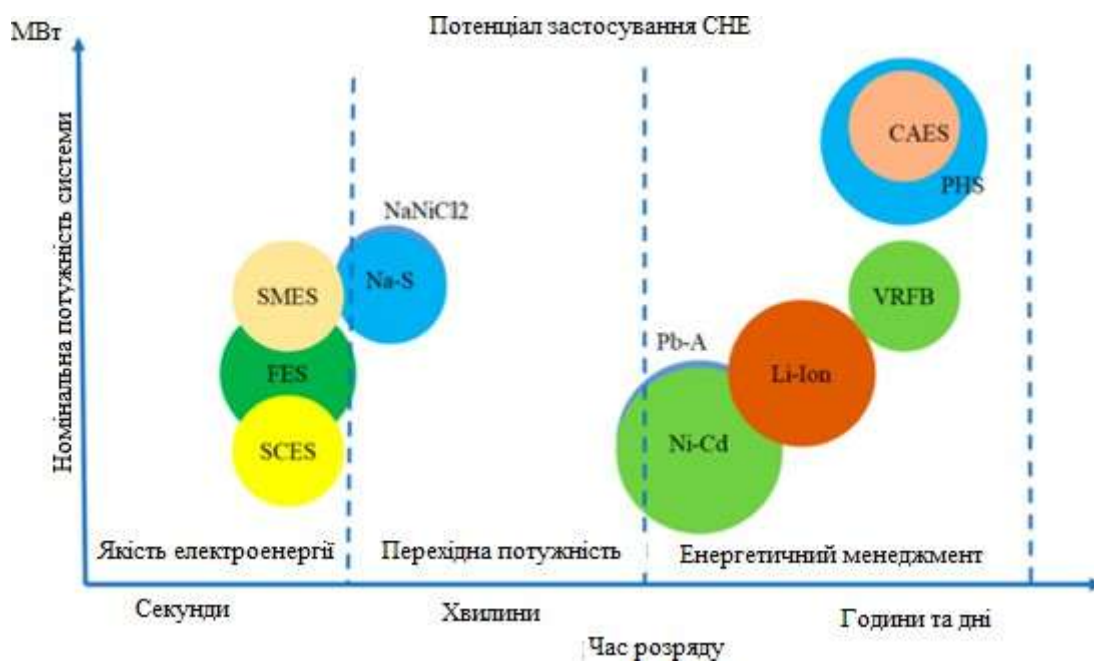


Таблиця 1.1 - Послуги, що забезпечуються системами накопичення енергії в електроенергетиці [7]

Послуги в сфері генерації	Допоміжні послуги	Послуги в сфері систем передачі	Послуги в сфері систем розподілу	Послуги споживачам
Енергетичний арбітраж	Первинне регулювання частоти	Відтермінування інвестицій	Підтримка потужності	Зменшення пікового навантаження
Підтримка потужності	Вторинне регулювання частоти	Підтримка стійкості	Підтримка у непередбачуваних ситуаціях	Управління цінами
Оптимізація роботи традиційних джерел генерації	Третинне регулювання частоти	Підтримка систем передачі	Відтермінування інвестицій	Якість електричної енергії
Підтримка потужності ВДЕ	Стабілізація частоти		Якість електричної енергії	Максимізація власної генерації
Мінімізація обмежень використання ВДЕ	Відновлення роботи		Динамічне локальне регулювання напруги	Управління платою за попит
Обмеження збурень	Підтримка напруги		Навмисне відокремлення	Безперервність електропостачання
			Обмеження збурень	Обмеження збурень
			Компенсація реактивної потужності	Компенсація реактивної потужності
				Інтеграція електромобілів



Рекомендації щодо застосування систем накопичення енергії в електроенергетичному секторі



Порівняння систем накопичення енергії залежно від потужності та часу відгуку (швидкості)

Таблиця 1.6 - Основні технічні характеристики засобів накопичення енергії, орієнтованих на використання в розподільних системах

Технічний засіб накопичення енергії	Потужність МВт	Енергетична щільність Вт год/л	Щільність потужності Вт/л	Загальна ефективність %
FES	0,1 - 20	20 - 80	1000 - 2000	90 - 95
Pb - A	0 - 40	50 - 80	10 - 400	70 - 90
Ni - Cd	0 - 40	60 - 150	150 - 300	65 - 90
Na - S	0,05 - 34	150 - 250	150 - 230	80 - 90
NaNiCl ₂	0 - 3	150 - 180	220 - 300	85 - 90
Li - ion	0 - 100	200 - 500	500 - 2000	85 - 97
VRFB	0,3 - 3	16 - 70	0,5 - 2	75 - 90
SCES	0 – 0,3	2,5 - 15	500 - 5000	90 - 98

Таблиця 1.7 - Основні технічні характеристики засобів накопичення енергії, орієнтованих на використання в розподільних системах

Технічний засіб накопичення енергії	Час розряду мсек - год	Час відгуку (швидкодія) мсек - год	Життєвий цикл рік	Добовий саморозряд %
FES	мсек – 15 мин	< 4 мсек - сек	15	24 - 100
Pb -A	сек - год	5 – 10 мсек	3 - 15	0,1 – 1,1
Ni - Cd	сек - год	20 мсек - сек	10 - 20	0,07 – 0,7
Na - S	сек - год	1 мсек - сек	10 - 15	20
NaNiCl ₂	сек - год	< сек	10 - 14	11,9 – 26,2
Li - ion	хв - год	20 мсек	5 - 15	0,03 – 0,3
VRFB	сек - год	сек	5 - 10	незначний
SCES	мсек – год	8 мсек	20	0,5- 40

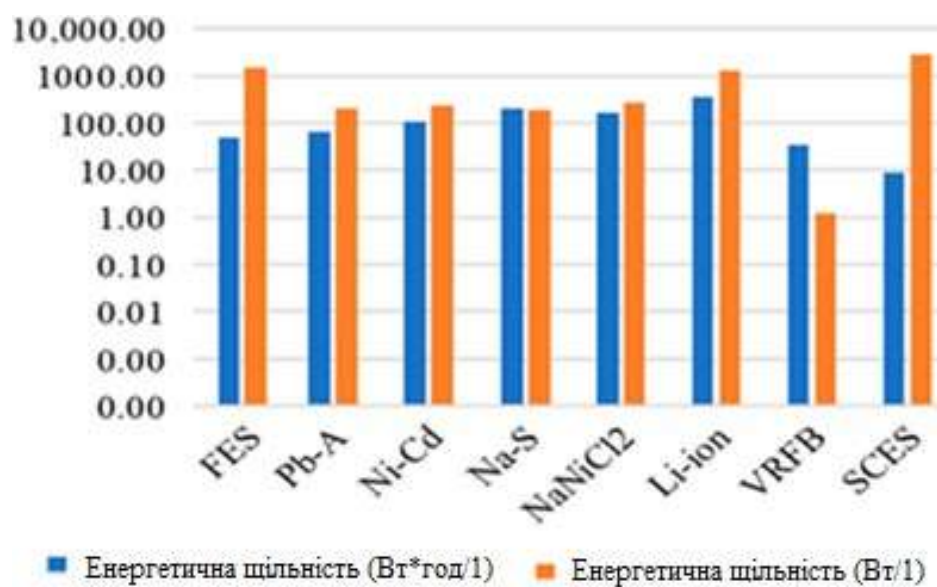


Рисунок 1.7 - Порівняння енергетичної щільності окремих технічних засобів накопичення енергії

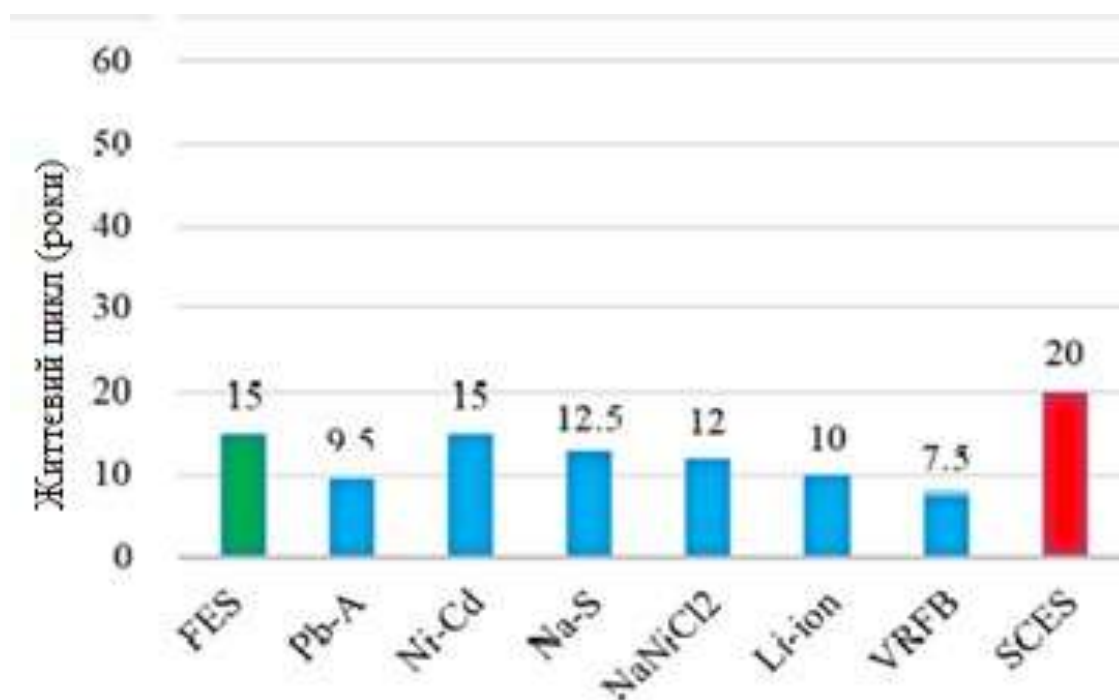
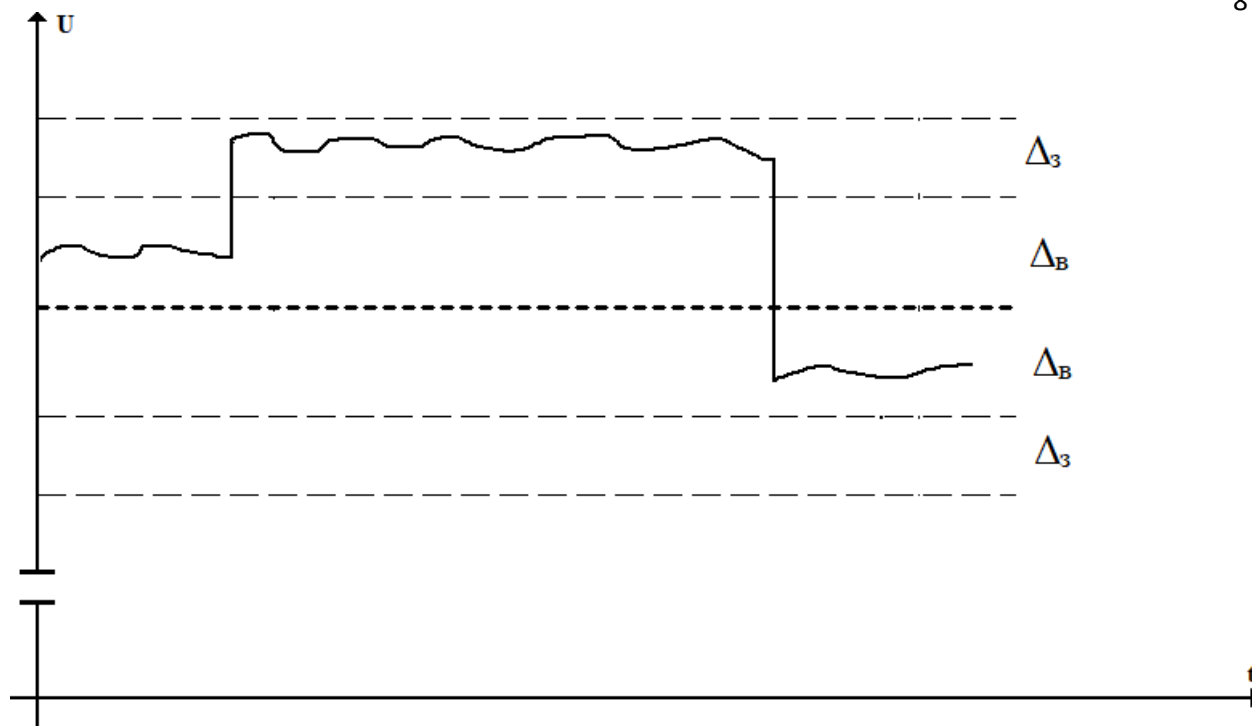


Рисунок 1.8 - Порівняння життєвого циклу окремих технічних засобів накопичення енергії



Застосування СНЕ при різких змінах потужності ДРГ

Використання СНЕ для вирішення задач регулювання напруги є одним з перспективних застосувань технологій накопичення. СНЕ дозволить збільшувати або зменшувати навантаження, цим самим, відповідно до закону регулювання напруги збільшувати або зменшувати напругу на підстанції

1. В бакалаврській кваліфікаційній роботі виконано дослідження існуючих технологій акумулювання електричної енергії в масштабі світового досвіду використання. Здійснений аналіз продемонстрував реальні перспективи широкого використання засобів акумулювання для вирішення задач в електроенергетичній галузі.

Виконаний аналіз дозволив оцінити перспективи використання СНЕ для вирішення завдань притаманним системам розподілу. Практичне застосування технологій накопичення дозволяє продемонструвати та порівняти їх технологічну зрілість, техніко-економічні та екологічні показники.

2. В роботі було розглянуто найбільш перспективні, з точки зору використання в розподільних мережах, технології накопичення електричної енергії. Кожна з них має свої переваги та недоліки, і вибір

конкретної технології залежить від конкретних потреб та вимог системи електропостачання. Ванадієві батареї мають високу ефективність та довговічність, Li-ion батареї мають високу енергетичну щільність та довгий термін служби, механічні системи накопичення мають високу енергетичну щільність та швидкий відгук на зміни попиту, сірчано-натрієві батареї мають високу енергетичну щільність та можуть забезпечувати довготривале зберігання енергії, а суперконденсатори можуть забезпечувати високу потужність та швидкий заряд та розряд енергії.

3. Було проаналізовано доцільність використання СНЕ для планування та управління режимами роботи розподільних мереж. Розроблено підхід для вирішення задачі мінімізації втрат потужності шляхом оцінки доцільності зміни топології контуру розподільної мережі на основі використання індикативного показника.