

Кафедра електричних станцій і систем

**Вплив електрохімічних накопичувачів енергії на енергоефективність розподільної мережі 110 кВ**

Кісельов О. М.

Керівник: д.т.н., доц., професор каф. ЕСС  
Кулик В. В.

« 06 » 06 2025 p.

Рецензент: К.Т.Н., доц.доц.кар ЕСЕМ  
(наук.ступінь, вч.звання, назва кафедри)

« 06 » 06 2025 г.

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

« 06 » 06 2025 г.

Вінниця ВНТУ 2025 рік

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

**ЗАТВЕРДЖУЮ**

**Завідувач кафедри ЕСС**

д.т.н., професор Комар В. О.

«10» 03 2025 р.

### **З А В Д А Н Н Я**

#### **НА БАКАЛАВРСЬКУ КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ СТУДЕНТУ**

Кісельов Олег Миколайович  
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи. «Вплив електрохімічних накопичувачів енергії на енергоефективність розподільної мережі 110 кВ»

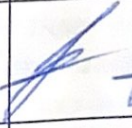
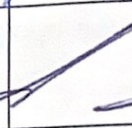
Керівник роботи д.т.н., доцент., проф каф. ЕСС Кулик В. В.  
затверджена наказом вищого навчального закладу від від 20.03.2025р № 97

2. Термін подання студентом роботи 03 червня 2025 року

3. Вихідні дані до роботи: Перелік літературних джерел за тематикою роботи: 1. Правила улаштування електроустановок. – Видання офіційне. Міненерговугілля України. – Х. : Видавництво «Форт», 2017. – 760 с. 2. M. Stecca, L. R. Elizondo, T. B. Soeiro, P. Bauer and P. Palensky, "A Comprehensive Review of the Integration of Battery Energy Storage Systems Into Distribution Networks," in IEEE Open Journal of the Industrial Electronics Society, vol. 1, pp. 46-65, 2020, doi: 10.1109/OJIES.2020.2981832. 3. Володимир Кулик, Олег Кісельов, «Електрохімічні накопичувачі енергії для підвищення енергоефективності розподільних мереж операторів систем розподілу,» в матеріалах Міжнародної науково-практичної інтернет-конференції "Молодь в науці: дослідження, проблеми, перспективи (МН-2025)", м. Вінниця, 15-16 червня 2025 р. –Режим доступу: <https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/mn/mn2025/paper/view/23500>

4. Зміст текстової частини: Вступ. 1. Аналіз використання електрохімічних накопичувачів. 2. Аналіз впливу електрохімічних накопичувачів на енергоефективність розподільної мережі 110 кВ 3. Оцінювання економічного ефекту впровадження ЕНЕ в розподільних мережах АТ «Вінницяобленерго». 4. Охорона праці. Висновки. Список використаних джерел. Додатки.

5. Перелік ілюстративного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень) \_\_\_\_\_

| 6. Консультанти розділів роботи |                                                                         |                                                                                     |                                                                                     |
|---------------------------------|-------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|
| Розділ                          | Прізвище, ініціали та посада консультанта                               | Підпис, дата                                                                        |                                                                                     |
|                                 |                                                                         | завдання видав                                                                      | виконання прийняв                                                                   |
| Спеціальна частина              | Керівник роботи Кулик В. В.,<br>д.т.н., доцент, професор<br>кафедри ЕСС |  |  |
| Охорона праці                   | Кобилянський О. В.<br>д. пед. н., професор, зав. каф.<br>БЖДПБ          |  |  |

7. Дата видачі завдання 20 березня 2025 року  
КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

| № з/п | Назва та зміст етапів                                                                                       | Термін виконання етапів роботи |             | Примітки                                                                              |
|-------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------|-------------|---------------------------------------------------------------------------------------|
|       |                                                                                                             | початок                        | кінець      |                                                                                       |
| 1     | Формування та затвердження завдання БКР                                                                     | 17.03.25 р.                    | 20.03.25 р. |    |
| 2     | Вступ. Огляд літературних джерел                                                                            | 20.03.25 р.                    | 28.03.25 р. |    |
| 3     | Аналіз використання електрохімічних накопичувачів (розділ 1 БКР)                                            | 28.03.25 р.                    | 11.04.25 р. |  |
| 4     | Аналіз впливу електрохімічних накопичувачів на енергоефективність розподільної мережі 110 кВ (розділ 2 БКР) | 11.04.25 р.                    | 02.05.25 р. |  |
| 5     | Оцінювання економічного ефекту впровадження ЕНЕ в розподільних мережах АТ «Вінницяобленерго» (розділ 3 БКР) | 02.05.25 р.                    | 16.05.25 р. |  |
| 6     | Охорона праці (розділ 4 БКР)                                                                                | 16.05.25 р.                    | 23.05.25 р. |  |
| 7     | Формування висновків по роботі                                                                              | 23.05.25 р.                    | 26.05.25 р. |  |
| 8     | Оформлення пояснювальної записки                                                                            | 26.05.25 р.                    | 30.05.25 р. |  |
| 9     | Виконання графічної частини та оформлення презентації                                                       | 30.05.25 р.                    | 03.06.25 р. |  |

Студент

(підпис)

Кісельов О. М.

Керівник роботи

(підпис)

В. В. Кулик

## АНОТАЦІЯ

УДК 621.311.1

Кісельов Олег Миколайович «Вплив електрохімічних накопичувачів енергії на енергоефективність розподільної мережі 110 кВ». Бакалаврська кваліфікаційна робота. – Вінниця: ВНТУ. – 2025. – 84 с. Бібліогр.: 31. Рис. : 28. Табл. : 17

Бакалаврська кваліфікаційна робота присвячена дослідженню впливу електрохімічних накопичувачів енергії (ЕНЕ) на підвищення енергоефективності та надійності розподільної електричної мережі класу напруги 110 кВ. У роботі проаналізовано сучасний стан розвитку технологій ЕНЕ, їх технічні характеристики та роль в інтеграції відновлюваних джерел енергії. Розроблено методичні підходи до параметрів накопичувачів з урахуванням мінімізації втрат електроенергії. Проведено економічну оцінку впровадження систем накопичення енергії (BESS) у розподільчих мережах АТ «Вінницяобленерго», що підтвердила їх малий термін окупності близько 5 років. Розраховано дохід від експлуатації BESS потужністю 40 МВт за перші два тижні квітня 2025 року, який склав 3379 тис. грн. Запропоновано рекомендації щодо стратегії інтеграції ЕНЕ, включаючи алгоритми керування та координацію з системами автоматизації. Результати роботи демонструють значний потенціал ЕНЕ для оптимізації роботи розподільних мереж, підвищення якості електропостачання та забезпечення економічної ефективності в умовах зростання частки відновлюваних джерел енергії.

Ключові слова: електрохімічні накопичувачі енергії, розподільна мережа 110 кВ, енергоефективність, відновлювані джерела енергії, економічна оцінка, системи накопичення енергії.

## ABSTRACT

Kiselyov Oleg Mykolayovych “The influence of electrochemical energy storage on the energy efficiency of the 110 kV distribution network”. Bachelor's qualification work. – Vinnytsia: VNTU. – 2025. – 84 p. Bibliography: 31. Fig. : 28. Table. : 17

The thesis is devoted to the study of the influence of electrochemical energy storage (EES) on increasing the energy efficiency and reliability of the 110 kV voltage distribution network. The paper analyzes the current state of development of EES technologies, their technical characteristics and role in the integration of renewable energy sources. Methodological approaches to the parameters of the storage devices have been developed taking into account the minimization of electricity losses. An economic assessment of the implementation of energy storage systems (BESS) in the distribution networks of JSC “Vinnytsiaoblenergo” has been carried out, which confirmed their short payback period of about 5 years. The revenue from the operation of a 40 MW BESS for the first two weeks of April 2025 was calculated, which amounted to UAH 3,379 thousand. Recommendations for the strategy of integrating ENE, including control algorithms and coordination with automation systems, are proposed. The results of the work demonstrate the significant potential of ENE for optimizing the operation of distribution networks, improving the quality of electricity supply and ensuring economic efficiency in the context of an increasing share of renewable energy sources.

Keywords: electrochemical energy storage, 110 kV distribution network, energy efficiency, renewable energy sources, economic assessment, energy storage systems.

## ЗМІСТ

|                                                                                                      |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| ЗМІСТ .....                                                                                          | 3  |
| ВСТУП.....                                                                                           | 5  |
| 1 АНАЛІЗ ВИКОРИСТАННЯ ЕЛЕКТРОХІМІЧНИХ НАКОПИЧУВАЧІВ.....                                             | 7  |
| 1.1 Інтеграція ВДЕ в електроенергетичні системи та роль накопичувачів енергії.....                   | 10 |
| 1.2 Основні групи накопичувачів енергії.....                                                         | 15 |
| 1.3 Електрохімічні накопичувачі електроенергії .....                                                 | 17 |
| 1.3.1 Свинцево-кислотні акумулятори .....                                                            | 18 |
| 1.3.2 Нікель-кадмієві та нікель-металогібридні акумулятори.....                                      | 21 |
| 1.3.3 Літій-іонні акумулятори .....                                                                  | 23 |
| 2 АНАЛІЗ ВПЛИВУ ЕЛЕКТРОХІМІЧНИХ НАКОПИЧУВАЧІВ НА ЕНЕРГОЕФЕКТИВНІСТЬ РОЗПОДІЛЬНОЇ МЕРЕЖІ 110 КВ.....  | 33 |
| 2.2 Можливості використання ЕНЕ в розподільних мережах .....                                         | 37 |
| 2.3 Вплив ЕНЕ на втрати в мережі .....                                                               | 43 |
| 2.4 Оптимізація розміщення та керування електрохімічних накопичувачів енергії .....                  | 46 |
| 2.5 Управління та експлуатація BESS .....                                                            | 48 |
| 2.6 Інтеграція ЕНЕ у систему 110 кВ.....                                                             | 52 |
| 3 ОЦІНЮВАННЯ ЕКОНОМІЧНОГО ЕФЕКТУ ВПРОВАДЖЕННЯ ЕНЕ В РОЗПОДІЛЬНИХ МЕРЕЖАХ АТ «ВІННИЦЯОБЛЕНЕРГО».....  | 56 |
| 3.1 Економічна оцінка впровадження електрохімічних накопичувачів енергії в розподільчих мережах..... | 56 |
| 3.2 Оцінка прибутку від експлуатації ЕНЕ потужністю 40 МВт на початку квітня 2025 року .....         | 64 |
| 4 ОХОРОНА ПРАЦІ .....                                                                                | 68 |
| 4.1 Технічні рішення з безпечної експлуатації об'єкту.....                                           | 68 |
| 4.1.1 Технічні рішення з безпечної організації робочих місць .....                                   | 68 |
| 4.2 Технічні рішення з гігієни праці і виробничої санітарії.....                                     | 73 |
| 4.2.1 Мікроклімат .....                                                                              | 73 |
| 4.2.2 Склад повітря робочої зони .....                                                               | 73 |
| 4.2.3 Виробниче освітлення .....                                                                     | 74 |
| 4.2.4 Виробничий шум .....                                                                           | 75 |
| 4.3 Пожежна безпека .....                                                                            | 76 |

|                                                                        |    |
|------------------------------------------------------------------------|----|
|                                                                        | 4  |
| ВИСНОВКИ .....                                                         | 79 |
| СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ .....                                       | 81 |
| ДОДАТКИ.....                                                           | 85 |
| ДОДАТОК А Протокол перевірки навчальної (кваліфікаційної) роботи ..... | 86 |
| ДОДАТОК В ІЛЮСТРАТИВНА ЧАСТИНА .....                                   | 87 |

## ВСТУП

**Актуальність теми:** Сучасні розподільні мережі, зокрема мережі класу напруги 110 кВ, спочатку проєктувалися під централізоване електропостачання від великих генерувальних потужностей. Проте стрімкий розвиток відновлюваних джерел енергії (ВДЕ) — сонячної та вітрової генерації — та поширення нових типів навантажень, таких як електротранспорт, вимагають глибокої трансформації принципів функціонування енергосистем. Ці зміни супроводжуються нестабільністю генерації та потребують нових технічних рішень для забезпечення надійної та ефективної роботи мереж. Одним із найбільш перспективних рішень є впровадження електрохімічних накопичувачів енергії (ЕНЕ), які здатні забезпечити гнучкість, оптимізувати розподіл потужності та покращити енергоефективність.

Попри активне дослідження технологій зберігання енергії, практичне застосування електрохімічних накопичувачів у системах 110 кВ потребує подальшого аналізу з урахуванням технічних, економічних та експлуатаційних чинників. Таким чином, дослідження впливу ЕНЕ на роботу розподільної мережі 110 кВ є вкрай актуальним.

**Метою бакалаврської кваліфікаційної роботи** є підвищення енергоефективності та надійності функціонування розподільної електромережі 110 кВ шляхом обґрунтованої інтеграції електрохімічних накопичувачів енергії.

Завдання дослідження

Для досягнення поставленої мети в роботі необхідно вирішити такі основні завдання:

- провести аналіз сучасного стану розвитку електрохімічних накопичувачів енергії (ЕНЕ) та їхньої ролі в інтеграції відновлюваних джерел енергії до електричних мереж;
- дослідити технічні характеристики, типи та принципи роботи основних ЕНЕ, які доцільно застосовувати в мережах класу напруги 110 кВ;

- розробити методичні підходи до оптимального вибору місць розміщення та параметрів накопичувачів енергії з урахуванням впливу на втрати електроенергії в мережі;
- здійснити детальну економічну оцінку доцільності впровадження ЕНЕ у розподільних мережах — зокрема, визначити ефективність інвестицій, прогнозований прибуток від експлуатації систем накопичення, терміни окупності та ключові економічні показники для конкретного підприємства АТ «Вінницяобленерго»;
- розробити рекомендації щодо стратегії впровадження ЕНЕ в існуючі розподільні мережі з урахуванням техніко-економічних та нормативних обмежень.

Об'єктом дослідження є процес функціонування розподільної електричної мережі класу напруги 110 кВ в умовах впровадження електрохімічних накопичувачів енергії.

Предметом дослідження є технічні, економічні та алгоритмічні підходи до оптимального впровадження електрохімічних накопичувачів у розподільні мережі з метою підвищення їх енергоефективності.

## 1 АНАЛІЗ ВИКОРИСТАННЯ ЕЛЕКТРОХІМІЧНИХ НАКОПИЧУВАЧІВ

У теперішній час ключову роль у глобальній й українській електроенергетиці відіграють альтернативні способи виробництва електроенергії, що базуються на відновлювальних джерелах енергії (ВДЕ).

Їм притаманні: порівняно невелика потужність та розподіленість по великих територіях. Генерація ВДЕ й активні споживачі зазвичай характеризуються значно нерівномірним режимом видачі та використання електроенергії. Управління такими особливими, особливо численними об'єктами ВДЕ-генерації становить доволі складну задачу.

Важливу роль у подоланні цієї проблеми для ВДЕ малої потужності відіграють акумуляторні батареї – реверсивні пристрої, призначені для часткового або повного розмежування в часі виробництва й споживання електроенергії. У таких накопичувачах енергії (ЕНЕ) відбувається накопичення електроенергії та її збереження. За потреби ця енергія може передаватися до локальної мережі з ВДЕ.

Із розвитком електроенергетичних систем (ЕЕС) та збільшенням потужностей агрегатів, що виробляють енергію, проблема накопичення й збереження енергії стає все більш актуальною. Усунути цей недолік можливо через створення ЕНЕ – реверсивних пристроїв для часткового чи повного розділення у часі генерації та споживання енергії. У ЕНЕ здійснюється накопичення енергії, отриманої з ЕЕС, її зберігання та видача за потреби назад в енергосистему.

За наявності достатньої кількості тих чи інших ЕНЕ їх можна застосовувати для забезпечення певної частки пікового чи максимального навантаження в ЕЕС. Це забезпечує суттєвий економічний результат, який залежить від виду енергоакumuлюючих пристроїв – накопичувачів та їхніх параметрів. Важливу роль для досягнення економічного ефекту й покращення керованості ЕЕС відіграє також оптимальне розташування таких пристроїв.

Отже, НЕ виступають ключовою сполучною ланкою між системами

виробництва електроенергії та системами її розподілу й споживання.

В умовах переходу глобальної економіки до енергоефективного та низьковуглецевого розвитку одним із пріоритетних завдань електроенергетики є активне впровадження ВДЕ. Розвиток ВДЕ у світі є логічним з огляду на екологічні та економічні фактори (незалежність від імпорту палива, захист від аварій на великих електростанціях чи магістральних лініях електропередач).

За інформацією USAID, на рисунках 1.1 та 1.2 зображено графіки приросту щорічних встановлених потужностей вітрових електростанцій (ВЕС) і сонячних електростанцій (СЕС) із фотоелектричними панелями, починаючи з 2001 року.

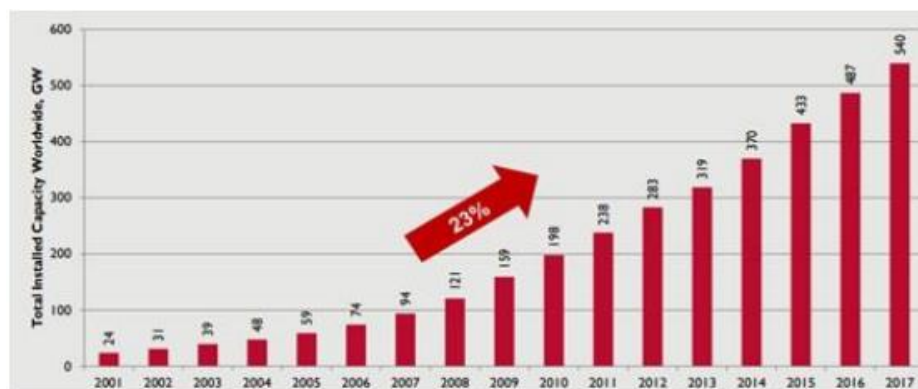


Рисунок 1.1 – Зростання встановленою потужності ВЕС по рокам

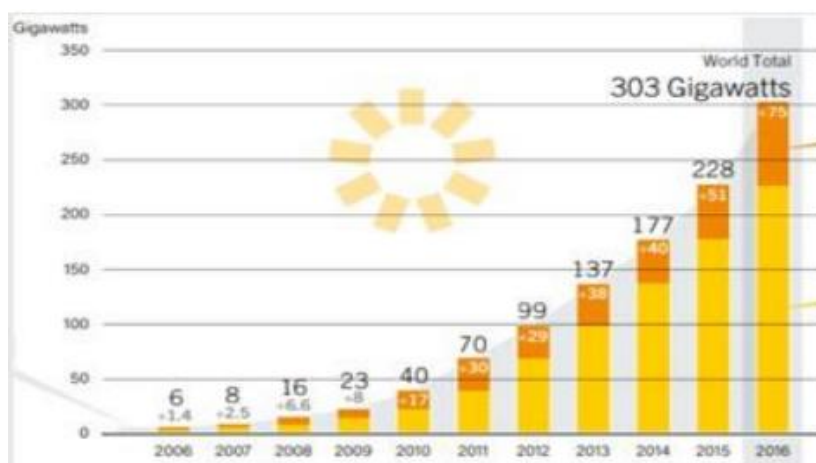


Рисунок 1.2 – Зростання потужності СЕС по рокам і щорічні прирости

Наразі в Україні значна увага приділяється розвитку ВДЕ. Ефективні законодавчі заходи підтримки відновлювальної енергетики (з 2014 року)

дозволили за сім років ввести в експлуатацію понад 1466 МВт сонячних і вітрових електростанцій та приблизно 114 МВт малих гідроелектростанцій (ГЕС). Запровадження ринкових механізмів відбору проєктів ВДЕ з 2018 року сприяло зниженню середньої вартості електроенергії від вітрових (на 14%) та сонячних (на 55%) електростанцій до рівня, порівнянного з газовою генерацією.

Концепція децентралізованої енергосистеми, що набирає популярності у світі, є привабливою для багатьох країн. Численні приватні домогосподарства можуть виробляти енергію для власних потреб, споживаючи її без втрат у мережах, а надлишок передавати в мережу, беручи участь у ринку електроенергії. Тому розподілена генерація малої потужності на основі ВДЕ є актуальною й для України.

Водночас потужність, вироблена ВДЕ, є нестабільною та має сезонні й добові коливання. З іншого боку, графіки навантаження споживачів також змінюються залежно від часу доби чи року. Це зумовлює потребу в розробці системи, яка б узгоджувала генерацію та споживання енергії від ВДЕ.

Особливістю ВДЕ є значні сезонні відмінності в інтенсивності вітру та сонячного випромінювання, що відображено на рисунку 1.3 [12].

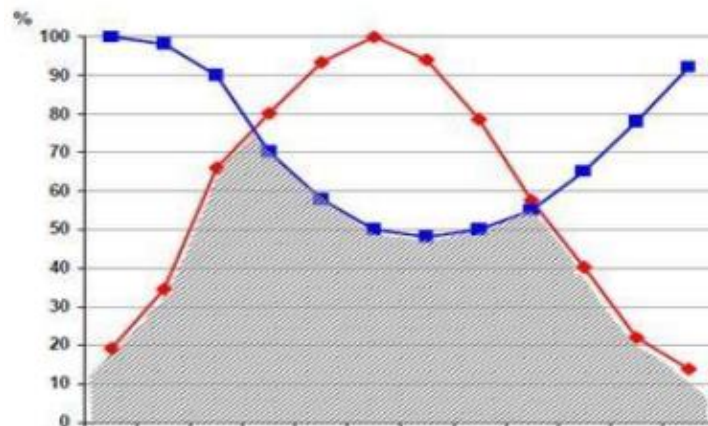


Рисунок 1.3 – Графіки вироблення і споживання електроенергії від ВДЕ за рік

З рисунка 1.3 видно, що графік виробництва електроенергії СЕС майже не збігається з графіком споживання. Червона лінія відображає генерацію електроенергії сонячними електростанціями, а синя – споживання електричної енергії.

Окрім сезонних коливань у виробленні електроенергії, спостерігається мінливість добового виробітку як на ВЕС, так і на СЕС.

Крім вирівнювання добових нерівномірностей між генерацією та споживанням, важливо оцінити перспективи використання накопичувачів, які забезпечують довготривале зберігання електроенергії (міжнародний термін Energy storage) з можливістю її видачі протягом кількох діб або навіть десятків діб після генерації.

### 1.1 Інтеграція ВДЕ в електроенергетичні системи та роль накопичувачів енергії

Інтеграція та розвиток ВДЕ в електроенергетичних системах мають свої особливості.

У джерелах [13, 14] описано чотири етапи поширення мінливих ВДЕ та застосування мобільних потужностей для цього. Кожна стадія, зазначена в таблиці 1.1, характеризується специфічними рисами.

На початковому етапі, коли частка ВДЕ у річному виробництві електроенергії не перевищує 3%, їхня інтеграція майже не впливає на мережу. Нестабільне вироблення сонячних і вітрових електростанцій тут сприймається як звичайні щоденні чи «природні» коливання попиту на електроенергію. Зазвичай спеціальних заходів для інтеграції не потрібно. Енергосистема, завдяки модернізації системи управління, самостійно забезпечує процес впровадження ВДЕ.

На другому етапі, коли частка ВДЕ зростає до 3–15%, їхній вплив на систему стає помітним. Потрібна адаптація наявних засобів регулювання, технологій і вдосконалення методів управління енергосистемою шляхом «інтелектуального» прогнозування генерації вітрових і сонячних електростанцій.

На цьому етапі накопичувачі енергії стають необхідними для збільшення потужності ВДЕ.

На третьому етапі, коли частка ВДЕ перевищує 15% річного вироблення електроенергії, інтеграція нестабільних ВДЕ створює значні виклики для енергосистеми. Їхній вплив проявляється як на рівні всієї системи, так і в роботі традиційних електростанцій. Ключовим фактором стає гнучкість енергосистеми – її здатність адаптуватися до мінливості та невизначеності балансу між попитом і пропозицією. На цьому етапі необхідна ґрунтовна перебудова функціонування енергосистеми та впровадження нових інструментів і засобів для її підтримки. Основними гнучкими ресурсами є маневрені електростанції та мережі, але дедалі більшого значення набувають управління попитом і новітні технології накопичення енергії.

На четвертій стадії, коли ВДЕ забезпечують понад 50% річного вироблення, для їхньої успішної інтеграції в енергосистему насамперед потрібно вирішити питання стандартизації технічних вимог до обладнання ВДЕ, що вводиться в експлуатацію.

Головне завдання НЕ – сформувати нову енергетичну інфраструктуру, яка не лише об'єднує центри генерації та споживання в єдину енергетичну «систему систем» за їхньої участі, але й інтегрує автономні, розподілені та централізовані системи разом із ВДЕ [14, 15].

Таблиця 1.1 - Стадії поширення ВДЕ

| Ознаки,<br>зростаючі по<br>мірі<br>проходження<br>фаз | Фаза перша                                                       | Фаза друга                                                 | Фаза третя                                                                                | Фаза четверта                                                                                              |
|-------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1                                                     | 2                                                                | 3                                                          | 4                                                                                         | 5                                                                                                          |
| Характеристика<br>з погляду<br>системи                | Потужність<br>ВДЕ не має<br>значення на<br>громадському<br>рівні | Потужність ВДЕ<br>стає помітною<br>системному<br>оператору | Гнучкість стає<br>актуальною через<br>великі коливання<br>балансу попиту<br>та пропозиції | Стабільність<br>стає<br>актуальною.<br>Потужність<br>ВДЕ покриває<br>майже 100%<br>попиту на<br>певний час |

| Ознаки,<br>зростаючі по<br>мірі<br>проходження<br>фаз | Фаза перша                                                                      | Фаза друга                                                                                                                                                                                         | Фаза третя                                                                                                                                                                                                                                       | Фаза четверта                                                                                                                |
|-------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1                                                     | 2                                                                               | 3                                                                                                                                                                                                  | 4                                                                                                                                                                                                                                                | 5                                                                                                                            |
| Вплив на<br>існуючий склад<br>генераторів             | Немає<br>помітної<br>різниці між<br>наявністю ВДЕ<br>та чистим<br>навантаженням | Немає значного<br>зростання<br>невизначеності<br>та мінливості<br>чистої<br>навантаженості,<br>але є невеликі<br>зміни в схемах<br>роботи існуючих<br>генераторів, щоб<br>пристосуватися<br>до ВДЕ | Велика<br>мінливість<br>чистого<br>навантаження.<br>Основні<br>відмінності у<br>схемах роботи:<br>скорочення<br>кількості<br>електростанцій,<br>що працюють<br>безперервно                                                                       | Жодна<br>електростанція<br>не працює<br>піддосвідно, всі<br>електростанції<br>регулюють<br>потужність<br>відповідно з<br>ВДЕ |
| Вплив на<br>мережу                                    | Стан локальної<br>мережі<br>поблизу точок<br>підключення,<br>якщо такі є        | Дуже ймовірно,<br>що це вплине на<br>місцеві умови<br>мережі, можливе<br>перевантаження<br>передачі,<br>викликане<br>зміщенням<br>потоків<br>потужності<br>через мережу                            | Значні зміни у<br>структурі потоків<br>електроенергії<br>через мережу,<br>обумовлені<br>погодними<br>умовами в різних<br>місцях;<br>збільшення<br>двосторонніх<br>потоків між<br>високовольтними<br>та<br>низьковольтними<br>частинами<br>мережі | Потреба у<br>посиленні всієї<br>мережі та<br>покращення<br>здатності<br>мережі<br>відновлюватись<br>після збурень            |
| Проблеми<br>залежать<br>головним<br>чином від         | Місцевих умов<br>у мережі                                                       | Відповідності<br>між попитом та<br>потужністю ВДЕ                                                                                                                                                  | Наявність<br>гнучких ресурсів                                                                                                                                                                                                                    | Стійкість<br>енергосистеми<br>протистояти<br>збуренням                                                                       |

Отже, у триланковій моделі «виробництво, передача з розподілом та споживання енергії» з'явилася нова складова – накопичувачі енергії, яка розширила функціональні можливості кожної ланки. НЕ позитивно впливають як на технологічні аспекти електроенергетики, так і на економічні показники. При цьому накопичувачі здатні приносити користь кожній ланці цього ланцюга. У таблиці 1.2 представлено можливості впливу накопичувачів на процеси генерації, розподілу та споживання електроенергії.

Таблиця 1.2 - Вплив накопичувачів на процеси

| Генерація                                | Розподіл                                                | Споживання                                  |
|------------------------------------------|---------------------------------------------------------|---------------------------------------------|
| Виконання функцій маневреної потужності  | Зниження втрат в мережі під час передачі електроенергії | Зниження плати за підключення               |
| Регулювання частоти                      | Збільшення пропускної здатності мережі                  | Згладжування піків споживання               |
| Забезпечення динамічної стійкості        | Підвищення надійності обладнання підстанцій             | Згладжування провалів та перервання напруги |
| Компенсація міжсистемних перетікань      | Зниження навантаження на мережеве обладнання            | Симетрування навантаження по фазах          |
| Виконання функцій гарячого резерву       | Зниження витрати кольорових металів                     | Компенсація реактивної потужності           |
| Оптимізація режимів роботи генератора    | Скорочення величини включеного резерву                  | Оптимізація режимів роботи місцевих ВДЕ     |
| Інтеграція мережевих ВДЕ в енергосистему | Поліпшення економічних показників                       | Забезпечення безперервного енергопостачання |
| Компенсація реактивної потужності        | Вивільнення потужності підстанцій                       | Демпфування можливих коливань               |

Великі ВДЕ, оснащені накопичувачами (акумуляторами) електроенергії, у багатьох енергосистемах світу вже досягають паритету з традиційними електростанціями не лише за вартістю, а й за продуктивністю. Наявні НЕ не тільки спрощують управління на самих ВДЕ, але й надають системні послуги для забезпечення нормального та аварійного режимів роботи енергосистеми, спростовуючи усталені уявлення про переваги традиційних джерел енергії.

Встановлення накопичувачів енергії на електростанціях і розподілених накопичувачів різних типів в енергосистемі, які можуть оперативно коригувати генерацію автоматично або за командою диспетчера, є значно економічнішим рішенням для резервування потужності сонячних і вітрових електростанцій порівняно з утриманням гарячого резерву на традиційних електростанціях. Це пояснюється тим, що встановлення накопичувачів потребує лише одноразових

інвестицій, тоді як гарячий резерв вимагає постійних витрат на паливо, яке споживається на численних електростанціях країни протягом багатьох років. Таким чином, сучасний резерв маневреної потужності слід формувати не за рахунок традиційних електростанцій, що спричиняє значні додаткові витрати, а шляхом встановлення накопичувачів на електростанціях і розширення їхньої присутності в енергосистемі.

Наявність накопичувачів разом з іншими інноваціями в енергосистемі сприяє зменшенню нестабільності генерації вітрової та сонячної енергії, що підвищує надійність ВДЕ, необхідну для конкуренції з традиційними джерелами. При цьому накопичувачі не лише покращують інтеграцію самих ВДЕ, але й впливають на режим функціонування енергосистеми, дозволяючи оперативно ліквідувати аварійні ситуації. Крім того, енергокомпанії завдяки накопичувачам можуть переключатися на використання накопиченої електроенергії замість централізованої мережі в періоди мінімального навантаження, коли ціна енергії є нижчою.

Функції, що забезпечуються системою накопичення енергії:

- ✓ Зрізання піків потужності;
- ✓ Режим джерела безперебійного живлення;
- ✓ Компенсація різко змінного навантаження;
- ✓ Регулювання напруги і частоти;
- ✓ Стабілізація роботи генераторного обладнання;
- ✓ Заміна «обертowego резерву»;
- ✓ Обмеження наростання і скидання навантаження (критично для газових генераторів).

Накопичувачі енергії, виконуючи роль маневреної потужності, зменшують пікове навантаження під час добового максимуму.

Для підтримання постійного балансу між попитом і пропозицією в енергосистемі потрібне точне щосекундне регулювання. Однією з ключових переваг акумуляторних батарей порівняно з іншими мережевими ресурсами є

їхня здатність діяти практично миттєво. Натомість газова електростанція в режимі очікування витрачає паливо на нагрівання води та створення пари для обертання турбін, але не постачає електроенергію в мережу.

## 1.2 Основні групи накопичувачів енергії

Накопичувачі енергії (НЕ), відомі на Заході як сховища енергії, нині інтегровані в кожен ланку енергетичних систем із ВДЕ. На рисунку 1.4 показано динаміку зростання ринку накопичувачів електроенергії (НЕЕ) та сегменту ринку НЕ для підтримки енергосистем.

НЕ – це пристрій, який здатен накопичувати, зберігати та, за потреби, видавати енергію для цільового використання. Вони різняться за обсягом збереженої енергії, швидкістю її накопичення й віддачі, питомою енергоємністю, тривалістю зберігання та іншими характеристиками.

НЕ діляться на три основні групи [15, 16]:

- накопичувачі електроенергії (НЕЕ);
- накопичувачі теплової енергії (НТЕ);
- накопичувачі механічної енергії (НМЕ).

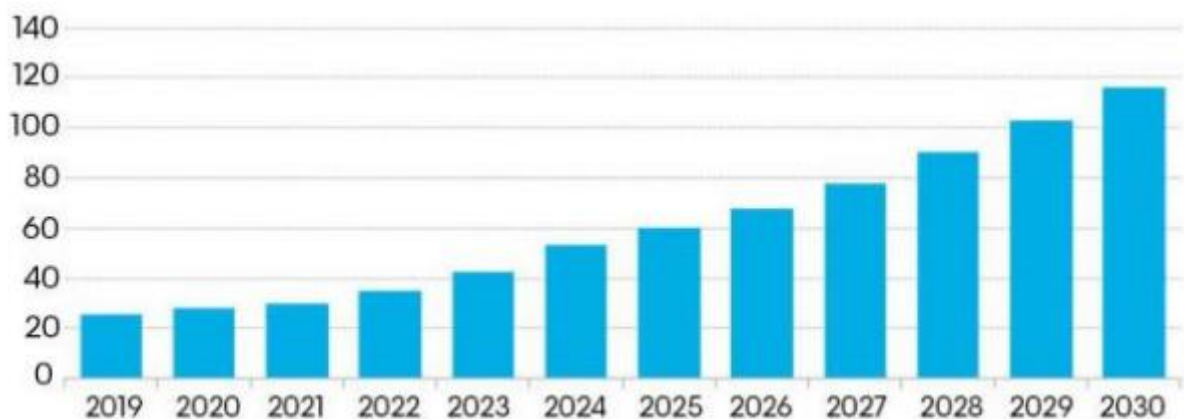


Рисунок 1.4 – Динаміка зростання ринку НЕЕ для підтримки енергосистем

Накопичувачі електроенергії є пристроями для зберігання різних форм енергії (хімічної, механічної, магнітної тощо) з подальшим її перетворенням і видачею у вигляді електричної енергії для використання. До них належать

електрохімічні акумуляторні батареї (АКБ), ємнісні накопичувачі (ЄН), електромеханічні накопичувачі (ЕМН), індуктивні накопичувачі (ІН), надпровідникові накопичувачі (НПН), лінійні накопичувачі електромагнітної енергії (ЛНН) тощо.

Працюючи паралельно з ЕЕС, ННН підключаються до системи через керований вентиляційний перетворювач, оскільки накопичення електричної енергії можливе лише за постійного струму.

Накопичувачі механічної енергії призначені для зберігання кінетичної або потенційної енергії з подальшою її видачею для виконання корисної роботи.

Основними режимами роботи НМЕ є заряд і розряд, а зберігання енергії є проміжним етапом. У режимі заряду НМЕ отримує механічну енергію від зовнішнього джерела, що реалізується за допомогою певних технічних рішень. Під час розряду основна частина збереженої енергії передається споживачу. Частина накопиченої енергії втрачається на компенсацію втрат, які виникають у розрядному режимі, а в більшості типів НМЕ – також у режимі зберігання.

Оскільки в низці накопичувальних систем час заряду значно перевищує час розряду ( $t_z \gg t_p$ ), середня потужність розряду  $P_p$  може суттєво перевищувати середню потужність заряду  $P_z$  у НМЕ. Таким чином, для накопичення енергії в НМЕ достатньо використовувати джерела з відносно низькою потужністю. НМЕ поділяються на три основні типи: статичні, динамічні та комбіновані пристрої.

Накопичувачі теплової енергії зберігають енергію шляхом підведення тепла. Їх класифікують на два типи: перший – накопичувачі, у яких температура зростає внаслідок підведення тепла; другий – ті, де теплота йде на фазовий перехід, найчастіше плавлення. У першому випадку питома енергія залежить від теплоємності речовини та діапазону зміни її температури, у другому – від прихованої теплоти фазового переходу.

Акумуляування теплоти є вкрай важливим, особливо для відновлюваних джерел енергії, які характеризуються нестабільністю в часі. Наприклад, використання сонячної енергії для опалення неможливе без накопичення

теплоти: акумулятор нагрівається за наявності сонячного випромінювання і віддає тепло за його відсутності. Крім того, накопичення теплоти сприяє вирівнюванню графіка енергоспоживання.

Серед розглянутих НЕ у роботі основна увага приділяється дослідженню НEE. За принципом отримання електричної енергії вони поділяються на три групи:

- НEE на основі енергоакумуючих систем;
- електрохімічні НEE;
- НEE на основі електричної і магнітної енергії.

### 1.3 Електрохімічні накопичувачі електроенергії

Основними типами НEE є електрохімічні акумуляторні батареї (АКБ), які мають питому потужність приблизно 1 кВт/кг.

Типова питома енергоємність АКБ становить близько 0,3 МДж/кг, а перспективна – до 1,8 МДж/кг. Термін служби АКБ у робочому стані може сягати кількох років [17].

Гранична енергоємність накопичувачів на основі свинцево-кислотних акумуляторів (СКА) оцінюється на рівні 109 Дж, хоча є проєктні розробки накопичувачів із енергоємністю до 1011 Дж. Перспективні моделі мають забезпечити високі питомі характеристики – 1 кДж/г та 2 кВт/см<sup>3</sup> [15, 16].

Питомі характеристики потужності основних типів АКБ зображено на рисунку 1.6.

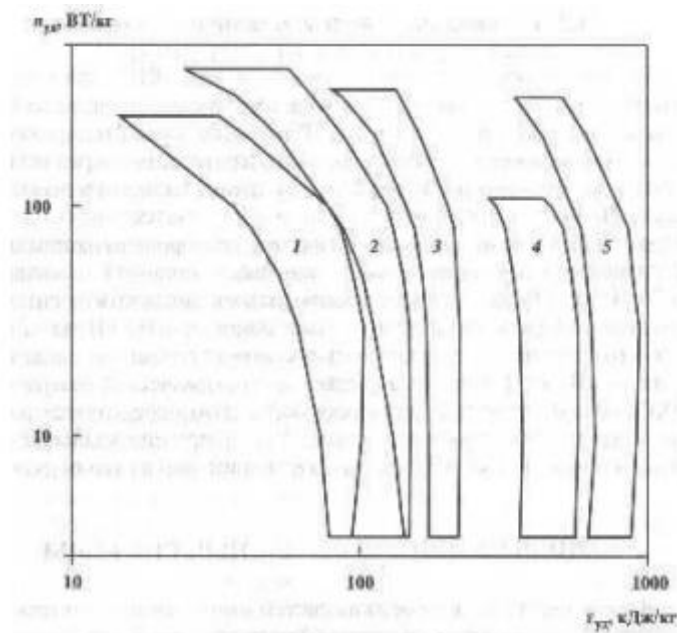


Рисунок 1.6 – Питомі енергетичні характеристики основних типів АКБ:

1 – свинцеві, 2 – нікель-кадмієві, 3 – нікель-цинкові, 4 - хлор-цинкові, 5 - сірчано -натрієві

Умови використання висувають додаткові вимоги до зменшення або повного усунення струмів саморозряду. Водночас для малої автономної енергетики вирішальними стають масогабаритні параметри акумуляторів.

### 1.3.1 Свинцево-кислотні акумулятори

Свинцево-кислотні батареї (СКА) – найдетальніше досліджений й поширений вид накопичувачів енергії для систем із ВДЕ, а також для численних інших застосувань. СКА застосовуються на великих електростанціях та підстанціях (як джерела резервного живлення власних потреб), у легкових машинах (для активації стартерів і забезпечення електроживлення). Активні компоненти акумулятора містяться в електроліті, а також у позитивних і негативних електродах.

У СКА електроліт становить розчин сірчаної кислоти, активною речовиною позитивних пластин є діоксид свинцю  $PbO_2$ , а негативних – чистий свинець  $Pb$ . Схема складових частин СКА зображена на рисунку.

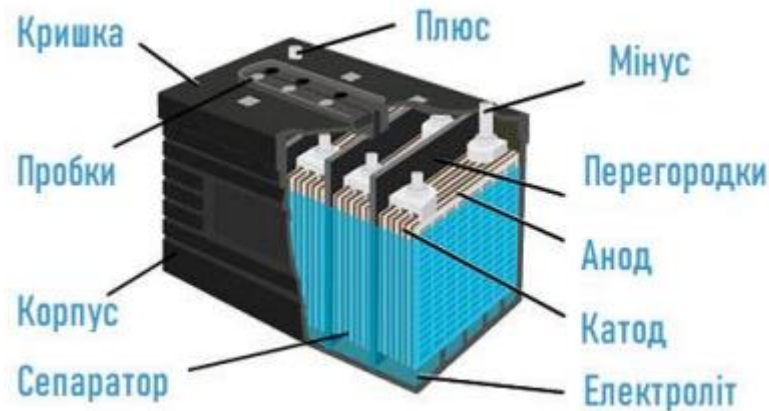
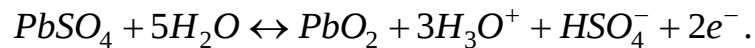


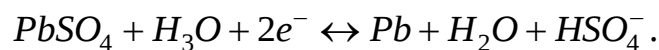
Рисунок 1.7 – Складові частини СКА

При роботі СКА протікають наступні електрохімічні реакції [7]:

Анодна реакція (заряд)



Катодна реакція (заряд)



Різновиди СКА відрізняються хімічними домішками в матеріалах позитивних й негативних пластин, станом електроліту та сферами використання. Початкові СКА були заливними батареями з рідким електролітом, де позитивні та негативні електроди занурювалися у водний розчин сірчаної кислоти. Ця технологія проста й економічна, тому такі акумулятори часто застосовують у стартерних батареях автомобілів. Вони також використовуються в стаціонарних системах резервного живлення. Такі батареї потребують регулярного обслуговування, зокрема перевірки рівня та концентрації кислоти. Втрати кислоти відбуваються через випаровування електроліту або електроліз під час заряджання. Останнє спричиняє виділення водню в процесі заряду, що вимагає вентиляції приміщень. Ці СКА дозволяється експлуатувати лише в горизонтальному положенні. Для більшості СКА, з метою збереження ресурсу, глибина розряду обмежується 30% від номінальної ємності.

До слабких сторін свинцево-кислотних батарей належать:

- чутливість до температури навколишнього середовища;

- низькі питомі характеристики (порядку 20–30 Втч/кг);
- невелика глибина розряду (до 30-50%);
- відносно низький ресурс (500-800 циклів при глибині розряду 40-50% для більшості виробників).

З часом конструкція й технології виготовлення СКА зазнали численних удосконалень, насамперед орієнтованих на збільшення терміну служби та спрощення обслуговування. Ключовою перевагою свинцево-кислотних батарей є відпрацьована технологія їх серійного виробництва, що значно знижує їхню вартість – ці накопичувачі є найекономічнішими за одиницю обладнання [18, 19].

На ринку з'явилися герметичні акумулятори з електролітом, іммобілізованим у полімерній матриці (AGM – Absorbed Glass Mat) або в гелевій формі (Gel). Такі СКА не потребують догляду й можуть функціонувати в будь-якому положенні (переважно горизонтальному). Вони оснащені рекомбінаторами водню, які перетворюють газ, що виділяється під час електролізу, назад у воду, компенсуючи втрати електроліту при перезарядженні.

Проте тривалий або надмірно швидкий перезаряд СКА може спричинити вибух герметичної батареї через перегрів і підвищене газоутворення.

У різних типах СКА електроди модифікуються по-різному. В AGM-акумуляторах підвищена стійкість до режиму «жорсткого буфера», коли батарея тривалий час перебуває в стані постійного підзаряду. Цей режим типовий для систем аварійного живлення, де потрібне миттєве підключення навантаження при відключенні мережі. Середній термін експлуатації СКА в такому режимі, наприклад, на базових станціях мобільного зв'язку, становить від 3 до 5 років.

Гелеві батареї пристосовані для регулярних глибоких циклів заряду й розряду, тому їх найчастіше використовують у системах із відновлюваними джерелами енергії (ВДЕ). Такі СКА випускають із номінальною напругою 2, 6 або 12 В для застосування в сонячних енергосистемах (наприклад, "Sonenschein", "Delta", "Hoppescke", "Fiamm", "Rittar", "Prosolar", "Haze" тощо).

У 1993 році в Пуерто-Ріко на основі СКА було створено накопичувач енергії потужністю 20 МВт і ємністю 14 МВт·год. Ця установка розроблялася

для випробувань великого СКА, причому особливу увагу приділяли контролю температури та вирівнюванню параметрів окремих елементів батареї [17, 20].

Зовнішній вигляд гелевих акумуляторів із напругою 12 В зображено на рисунку 1.8.

СКА залишаються найпоширенішим рішенням для накопичення електроенергії для малих споживачів (наприклад, житлових будинків) або систем ВДЕ. Крім того, ці акумулятори широко застосовуються в системах резервного та безперебійного живлення різного призначення – від великих електричних підстанцій до джерел безперебійного живлення для персональних комп'ютерів.



Рисунок 1.8 – Гелеві акумуляторні батареї напругою 12 В

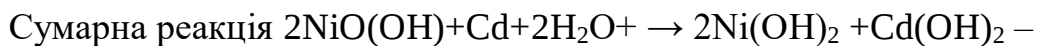
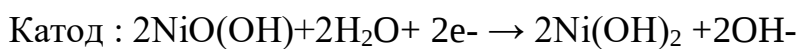
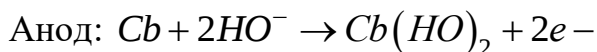
Популярність СКА значною мірою зумовлена традиційністю галузі, що віддає перевагу перевіреним технологіям, а також їхньою відносно низькою вартістю.

### 1.3.2 Нікель-кадмієві та нікель-металогібридні акумулятори

У нікель-кадмієвих акумуляторах (НКА) анодом слугує гідрат дигідроксиду нікелю  $\text{Ni(OH)}_2$ , змішаний із графітом (5–8% маси) для покращення провідності, а катодом – гідроксид кадмію  $\text{Cd(OH)}_2$  або металевий кадмій Cd у порошковій формі. Електролітом є водний розчин гідроксиду калію

КОН із щільністю 1,2 г/см<sup>3</sup>.

Основні реакції в НКА:



Залежно від конструкції, режиму роботи та частоти використаних матеріалів термін служби НКА складає від 100 до 9000 циклів заряду-розряду.

Термін служби НКА залежить від конструкції, режиму експлуатації та матеріалів і може становити від 100 до 9000 циклів заряду-розряду. Сучасні промислові НКА-батареї здатні працювати 20–25 років. НКА (NiCd) – єдиний тип акумуляторів, який допускає зберігання в розрядженому стані. Вони характеризуються стабільною роботою за низьких температур (–20°C) і мінімальним нагріванням під час заряду чи розряду великими струмами завдяки лужному електроліту. Основний недолік НКА – «ефект пам'яті», коли заряд не повністю розрядженого акумулятора знижує його робочу напругу через утворення додаткового подвійного електричного шару на електродах, що «блокує» залишкову ємність. Багаторазове повторення цього ефекту призводить до виходу акумулятора з ладу, тому НКА краще використовувати в системах із глибоким розрядом. Експлуатація в буферному режимі небажана. Для уникнення розбалансування батарей під час зберігання потрібна система контролю та вирівнювання напруги, інакше акумулятори обмінюватимуться зарядом малими струмами, що спричинить деградацію через ефект пам'яті. Контролер заряду для НКА має періодично виконувати повні цикли заряду-розряду для підтримки їхніх характеристик.

Значним недоліком НКА є вміст токсичного кадмію, що вимагає спеціалізованих методів утилізації таких акумуляторів та відходів їхнього виробництва.

НКА активно використовуються в бортових системах живлення різноманітних транспортних засобів – від електромобілів і радіокерованих моделей до авіаційної техніки. Нікель-кадмієві батареї характеризуються:

- підвищеними питомими характеристиками;
- стійкістю до низьких температур і високих допустимих струмів заряду та розряду.

Проте НКА не отримали широкого поширення в системах ВДЕ, хоча їх застосовують у вітродизельних енергоустановках для вирівнювання коливань генерації та споживання.

### 1.3.3 Літій-іонні акумулятори

Останнім часом активно розвиваються літій-іонні акумулятори (ЛІА), які дедалі ширше застосовуються в електротранспорті, портативних джерелах енергії, а також у космічній і авіаційній техніці.

ЛІА складаються з електродів (катодного матеріалу на алюмінієвій фользі та анодного на мідній фользі), розділених пористими сепараторами, просоченими електролітом. Електродний пакет розміщено в герметичному корпусі, де катоди й аноди з'єднані з клемми-струмознімачами. Корпус оснащений запобіжним клапаном, який скидає надлишковий тиск у разі аварій або порушення умов експлуатації.

Принцип дії ЛІА показаний на рисунку 1.9. [14-16].

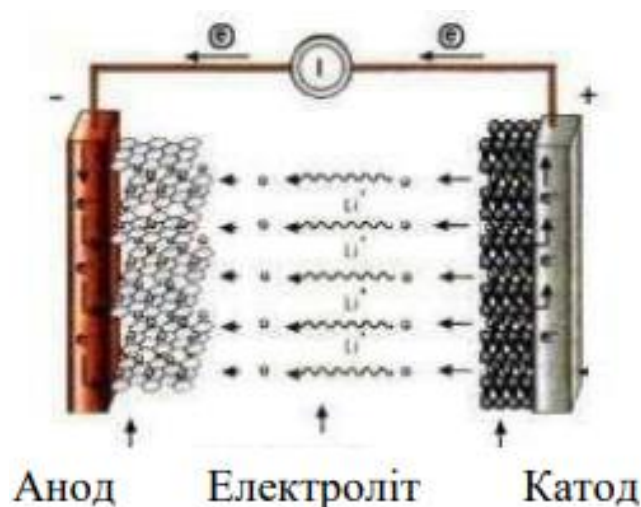


Рисунок 1.9 – Принцип дії ЛІА

Застосування органічних електролітів у ЛПА дало змогу збільшити напругу на окремому елементі до 3–5 В, порівняно з 1–1,5 В для кислотних і лужних акумуляторів. Під час заряду ЛПА іони літію інтеркалюються в анодний матеріал. Під час розряду іони літію деінтеркалюються, переміщуючись до катода, а вивільнені електрони створюють електричний струм у зовнішньому ланцюзі. Для ЛПА характерні:

- глибокі цикли заряду-розряду (70-80 %);
- висока енергоемність;
- відсутність ефекту пам'яті.

Варто зазначити, що термін служби та ціна ЛПА залежать від типу електрохімічних систем, використаних для катода й анода, а також від температурних умов і режимів роботи.

Основні переваги ЛПА порівняно з іншими акумуляторами включають високу енергетичну ємність, низький рівень саморозряду та велику кількість циклів заряду-розряду.

Серед недоліків першого покоління ЛПА була їхня схильність до вибухонебезпечності. Згодом цю проблему вирішили, замінивши матеріал анода на графіт. Крім того, сучасні зарядні пристрої для ЛПА запобігають перезаряду та перегріванню через надмірно швидке заряджання.

Проблема старіння та деградації акумуляторів при неналежному використанні залишається частково невирішеною. ЛПА втрачають ефективність або повністю виходять із ладу при повному розряді. Вони також чутливі до температурних умов. Оптимальний режим для них – 0–10°C із залишковим зарядом не нижче 40%. Зазвичай через два роки батарея втрачає щонайменше 20% ємності, навіть якщо не використовується [12].

Деякі характеристики літій-іонних акумуляторів наведено в таблиці 1.3 [10].

Таблиця 1.3 – Деякі властивості літій-іонних акумуляторів

| Катодна система                         | Питома енергія, Вт·ч/кг | Питома потужність, кВт/кг | Питома вартість \$ / Вт · год | Ресурс, циклів | Застосування                                      |
|-----------------------------------------|-------------------------|---------------------------|-------------------------------|----------------|---------------------------------------------------|
| Li (1-x) Mn <sub>2</sub> O <sub>4</sub> | 150                     | 0,8-1                     | 1-3                           | 1500           | Джерела безперебійного живлення, електротранспорт |
| LiCoO <sub>2</sub>                      | 180                     | 0,3-0,4                   | 2,8-5                         | 1200           | Споживча електроніка, електротранспорт            |
| LiFePO <sub>4</sub>                     | 110                     | 2-3                       | 0,4-2                         | Більше 2000    | Електротранспорт, стаціонарні системи             |

З таблиці 1.3 видно, що системи з високою енергоємністю мають менший термін служби та допускають розряд меншими струмами. Використання наноструктурованого титанату літію (Li<sub>4</sub>Ti<sub>5</sub>O<sub>12</sub>) як анодного матеріалу підвищує ресурс до 9000 циклів, але знижує енергоємність до 90 Вт·ч/кг.

Для безпечної та ефективної роботи ЛІА-батареї необхідна система контролю та управління (КУ).

Система КУ для ЛІА-батареї має:

- регулювати струми заряду й розряду;
- стежити за температурою окремих акумуляторів;
- вирівнювати напругу на кожному акумуляторі під час заряду та розряду.

Без такої системи може виникнути ситуація, коли вся батарея спрямовує енергію на заряд акумулятора з найнижчою напругою, що може спричинити його перезаряд, займання або вибух.

Системи КУ для ЛІА поділяються на активні та пасивні. Активні системи КУ індивідуально відключають або дозаряджають кожен акумулятор, тоді як пасивні знижують напругу на найбільш заряджених

акумуляторах, пропускаючи струм через балансувальний резистор, підключений паралельно до кожного акумулятора.

Пасивні системи КУ менш складні й дешевші, але їхній загальний ККД батареї нижчий через втрати енергії у вигляді тепла. Ці втрати зростають із більшим початковим розкидом напруги між окремими акумуляторами в батареї.

Незважаючи на високі питомі показники, до середини 2000-х років ЛПА переважно використовувалися в портативній електроніці. Застосування дорогого та вибухонебезпечного кобальтиту літію як основного катодного матеріалу обмежувало кількість елементів у батареї. До того ж такі ЛПА-батареї потребували складної системи контролю й управління, яка запобігала:

- високих значень струмів заряду і розряду;
- надмірного розігріву елементів;
- суттєвої різниці напруг між окремими елементами батареї.

Недотримання будь-якої з указаних вимог зазвичай спричиняє вибух елемента. За таких умов створення великих накопичувачів енергії (НЄЕ) на основі ЛПА було неможливим. Ситуація почала докорінно змінюватися з появою нових катодних матеріалів – олівіноподібних структур і шпинелей, які уможливили:

- підвищити безпека, ресурсні показники;
- зменшити вартість ЛПА-батареї без значного зниження їхньої енергоємності. Використання титанату літію як анодного матеріалу розширило температурний діапазон і забезпечило ресурс понад 6000 циклів при глибокому розряді та високих струмах.

Нині численні компанії, що спеціалізуються на виробництві акумуляторів для електромобілів, розпочали випуск ЛПА-систем для безперебійного, резервного та аварійного живлення. Завдяки високим питомим характеристикам ЛПА такі системи можна розміщувати в стандартних морських або автомобільних контейнерах.

Літій-залізо-фосфат виявився надзвичайно ефективним матеріалом для застосування в ЛПА.

Найбільшим накопичувачем енергії (НЄЕ) на основі ЛІА є резервна літій-іонна система компанії Altair-nano ємністю 250 кВт·год і потужністю 1 МВт, установлена на Гавайських островах для вітроелектростанції (ВЕС). Зовнішній вигляд цієї установки зображено на рисунку 1.10.

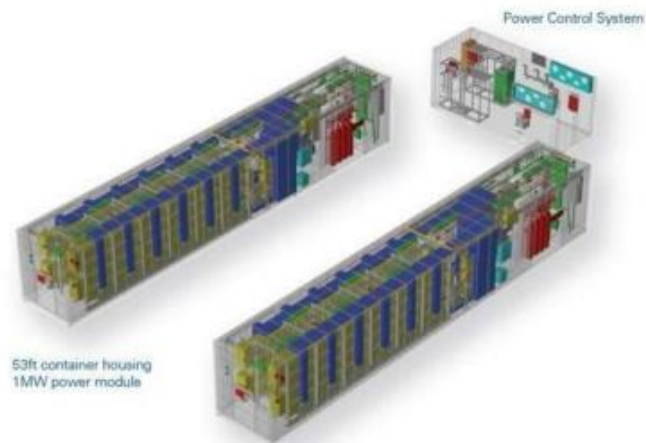


Рисунок 1.10 – Літій-іонний накопичувач енергії компанії Altair- nano ємністю 250 кВтг і потужністю 1 МВт

#### 1.3.4 Натрій-сірчані акумулятори

Принцип дії натрій-сірчаного акумулятора (НСА) продемонстровано рисунку 1.11.

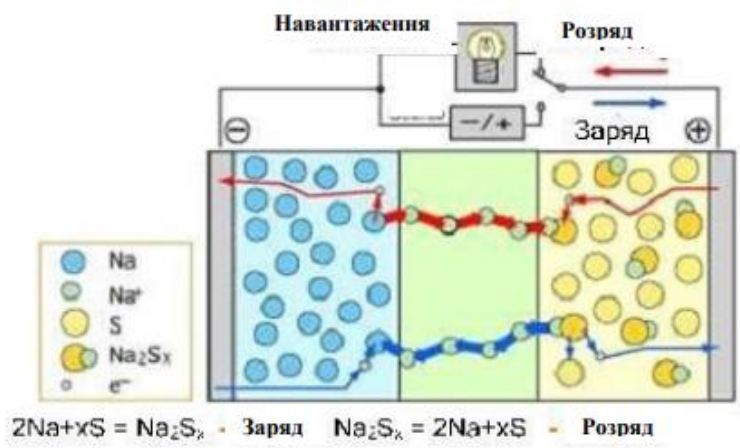


Рисунок 1.11 – Принцип дії НСА

Електрохімічна система, зображена на рисунку 1.11, значною мірою подібна до літєвої. У розрядженому вигляді натрій вступає у реакцію з сіркою,

утворюючи хімічну сполуку (натрієвий полісульфід), тоді як у зарядженому стані сірка й натрій існують як чисті речовини, розділені мембраною з кераміки. Основна різниця цих систем полягає в тому, що в НСА використовується керамічний електроліт. Це спричиняє підвищену робочу температуру НСА (від 290 до 360 °C).

У системах, створених і виготовлених серійно японською компанією NGK Insulators LTD, температура НСА в режимі очікування підтримується завдяки струмам саморозряду. Оскільки зниження температури викликає застигання реагентів та значне зменшення провідності іонів електроліту, конструкція НСА включає додаткові засоби теплоізоляції. Окрім ізоляції зовнішнього корпусу, застосовуються такі методи, як видалення повітря з внутрішнього простору батареї НСА, де розміщені окремі акумулятори, та покриття внутрішніх поверхонь цього простору фольгою (вакуумно-екранна ізоляція).

Теоретична енергоємність НСА може сягати 925 Вт·ч/кг, але реально досягнуті значення значно нижчі – від 100 до 150 Вт·ч/кг [14].

Практично отримані характеристики ресурсу НСА показують значення від 2000 до 4000 циклів за глибини розряду 80–90%.

На рисунку 1.12 представлено масштабний проєкт накопичення енергії з використанням НСА, виготовлених компанією NGK Insulators, в Абу-Дабі (Об'єднані Арабські Емірати).



Рисунок 1.12 – НСА потужністю 108 МВт в Абу-Дабі

П'ятнадцять систем акумуляторів НСА розміщено в десяти різних локаціях, загальною потужністю 108 МВт (12 систем по 4 МВт та три по 20 МВт) і ємністю 648 МВт·год. Кожна система є «шестигodinною», тобто здатна забезпечувати номінальну потужність протягом шести годин.

Комплекс НСА, зображений на рисунку 1.12, сприяє балансуванню навантаження в мережі Абу-Дабі вдень, а також виконує роль резерву при перебоях у електропостачанні.

Перспективи акумуляторів НСА зумовлені їхніми численними перевагами:

- значна питома енергія й потужність;
- висока оборотність і тривалий ресурс завдяки рідким електродам;
- герметичність, відсутність сторонніх реакцій і довгий термін зберігання;
- доступність і низька вартість основних матеріалів – натрію та сірки.

Проте НСА має суттєвий недолік – відносно висока робоча температура (близько 300 °C), яка значною мірою обмежує сфери їхнього застосування.

### 1.3.5 Проточні акумулятори

Наразі в розвинених країнах активно використовуються високоефективні проточні акумуляторні батареї (ПАБ).

ПАБ вирізняються структурою й принципом дії порівняно зі стандартними літій-іонними акумуляторами. Їхні активні хімічні компоненти – рідкі електроліти – містяться в двох окремих резервуарах. Для генерації електричної енергії ці рідини подаються в центральний блок із двома електродами, розділеними мембраною. Через цю мембрану відбувається обмін іонами, що й забезпечує вироблення електроенергії. Накопичення енергії здійснюється шляхом зворотного процесу.

У закордонній літературі проточні батареї (ПАБ) часто називають редокс-акумуляторами (від англ. Redox – окисно-відновлювальний).

Енергоємність ПАБ залежить від об'єму розчинів солей, тоді як потужність системи визначається числом та площею електрохімічних комірок. Відновлення

заряду системи досягається або через запуск зворотного процесу (з поданням зовнішньої напруги на комірки), або шляхом заміни розчинів у резервуарах на свіжі.

На ринку ПАБ найпоширенішими є три електрохімічні конфігурації: Fe | Cr (Deeya Energy), Zn | Br (Premium Power, ZBB), V | V (Golden Energy Fuel Cell, Prudent Energy, Cellstrom Power). Перша й остання системи застосовують рідкі розчини солей, тоді як у системах Premium Power і ZBB під час заряджання утворюється газоподібний бром. Високий тиск і токсичність цього газу змусили розробників забезпечити безпеку, зв'язуючи бром у складі метал-органічної сполуки під час зберігання.

ПАБ виготовляються у портативному виконанні, загальний вигляд якого зображено на рисунку 1.13



Рисунок 1.13– Мобільний ПАБ на основі електрохімічної системи Zn | Br (TransFlow2000, Premium Power, США)

На електродах каталізатори не застосовуються, хоча в деяких дослідженнях, спрямованих на збільшення щільності струму, аналізуються наноструктуровані матеріали на основі паладію та рутенію [16,17].

Переваги цієї системи особливо помітні під час сезонного регулювання енергосистем: розділення потужності та ємності дає змогу накопичувати електроліти влітку для використання під час пікових навантажень узимку. Максимальна концентрація ванадієвих солей наразі обмежує енергоемність системи до 15–20 Вт·год/кг, що порівнянно зі свинцево-кислотними

аккумуляторами. Попри це, було створено й протестовано транспортні енергоустановки на основі ванадієвих ПАБ [18].

Вартість таких систем коливається від 2000 до 8500 дол. США за кВт установленної потужності та від 30 до 100 дол. за кВт·год залежно від характеристик потужності й енергоємності [19].

Окрім зазначених систем, існують також ПАБ від компанії Cellstrom (Австрія) з потужністю 10 кВт і енергоємністю 100 кВт·год. Вони переважно використовуються для співпраці з вітровими та сонячними станціями малої потужності. Одна з таких систем, показана на рисунку 1.13, застосовується як зарядна станція для електротранспорту.

Найвизначнішим прикладом використання ванадієвих ПАБ є енергетичний комплекс на Тасманії, що поєднує ВЕС потужністю 2,5 МВт, дизель-генератор і ванадієві ПАБ (200 кВт, 4 години роботи, пікова потужність до 400 кВт). Вибір накопичувача для систем із ВДЕ залежить від специфіки енергоустановки, і універсального рішення не існує. Проте можна виділити певні критерії та обмеження, які допомагають проектувальникам підібрати оптимальний накопичувач для своєї системи.

Наразі розроблено численні типи електрохімічних аккумуляторів. Розглянемо кількісні параметри зазначених видів електрохімічних накопичувачів енергії (НЄЕ), зокрема клас потужності та тривалість розрядки.

Свинцево-кислотні аккумулятори (СКА) здобули популярність завдяки низькій вартості, відпрацьованій технології виготовлення та значному досвіду використання. Сьогодні СКА застосовуються в широкому спектрі номінальних потужностей (до 100 МВт). Однак використання токсичного свинцю створює певні труднощі. До того ж вони характеризуються низькою енергоємністю, обмеженою глибиною розряду та коротким часом розрядки (до 1 години).

Нікель-кадмієві аккумулятори (НКА) вирізняються високою енергоємністю, здатністю працювати за низьких температур і витримувати високі струми заряду/розряду. Проте їм притаманний ефект пам'яті, що погіршує їхні характеристики. Також НКА є найвибагливішими до умов експлуатації.

Через це їхній час розрядки становить приблизно 30 хвилин, що робить їх придатними для забезпечення якості електроенергії та резервного живлення споживачів малої потужності.

Натрій-сірчані акумулятори (НСА) мають високі ресурсні показники (2000–4000 циклів) при глибині розряду 80–90 %. Попри нездатність зберігати енергію протягом тривалого часу (енергія витрачається на підтримання температури електролітів за кілька годин), ці акумулятори затребувані для резервного живлення та регулювання режимів роботи енергосистем.

Літій-іонні акумулятори (ЛІА) вирізняються високою енергоємністю, можливістю глибокого розряду (70–80 %) і відсутністю ефекту пам'яті. Проте питання вибухонебезпечності ЛІА великої потужності залишається частково нерозв'язаним, що робить їх оптимальними для забезпечення стабільності електропостачання.

Проточні акумуляторні батареї (ПАБ) мають значну ємність і тривалий термін експлуатації (до 20 років). Їхній принцип дії дозволяє створювати НЕЕ з потужністю в сотні мегават. ПАБ здатні функціонувати за низьких і високих температур без деградації, оскільки об'єм електроліту залишається сталим. Завдяки цим характеристикам ПАБ є надійним резервним джерелом живлення та можуть використовуватися для регулювання режимів енергосистем.

Аналіз ключових характеристик (потужності й часу розряду) та особливостей електрохімічних НЕЕ дає змогу оцінити їхнє застосування для різних завдань у системах електропостачання.

Виділено три умовні зони застосування електрохімічних НЕЕ залежно від їхньої потужності та тривалості розряду:

- в управлінні режимами енергосистеми;
- в ролі резервного джерела електроенергії;
- забезпечення якості електропостачання.

## 2 АНАЛІЗ ВПЛИВУ ЕЛЕКТРОХІМІЧНИХ НАКОПИЧУВАЧІВ НА ЕНЕРГОЕФЕКТИВНІСТЬ РОЗПОДІЛЬНОЇ МЕРЕЖІ 110 КВ

### 2.1 Технічні характеристики електрохімічних накопичувачів енергії (ЕНЕ)

Електрохімічні накопичувачі енергії (ЕНЕ) відіграють ключову роль у підвищенні гнучкості та енергоефективності розподільних мереж. Їх використання у мережах напругою 110 кВ дозволяє не лише згладжувати пікові навантаження, а й покращити якість електроенергії, зменшити втрати потужності та реалізувати функціональне резервування. Основою таких систем є різні типи акумуляторних батарей, що відрізняються за технологією, параметрами роботи, вартістю та експлуатаційною ефективністю.

Серед основних технологій електрохімічних накопичувачів, що використовуються для стаціонарного зберігання енергії в енергосистемах, можна виділити наступні: свинцево-кислотні, натрій-сірчані, редокс-флоу та літій-іонні батареї. Вибір тієї чи іншої технології обумовлений специфікою застосування, вартісними та енергетичними характеристиками.

Свинцево-кислотні батареї є найстарішим і найпоширенішим видом акумуляторів, що використовуються у стаціонарних системах. Вони характеризуються порівняно низькою вартістю (\$50–600/кВт·год) та достатньо високим ККД (до 90%). Основними недоліками є низька енергоємність (20–30 Вт·год/кг) та обмежена кількість циклів заряду-розряду (до 2500 циклів), що обмежує їх довготривале використання у високонавантажених мережах [2].

Натрій-сірчані (NaS) батареї функціонують при високих температурах (приблизно 300°C) і забезпечують значно вищу енергетичну щільність (150–240 Вт·год/кг) та термін служби (до 4500 циклів). Їх використовують для балансування енергії у мережах з високою часткою відновлюваних джерел енергії [2].

Редокс-флоу батареї (наприклад, ванадієві або цинк-бромні) відзначаються незалежною зміною потужності та ємності, що дозволяє гнучко масштабувати

системи. Однак їх енергетична щільність залишається низькою (15–30 Вт·год/кг), а ККД сягає лише 75%. Попри це, довгий термін служби і можливість повного розряду без погіршення ресурсу роблять їх перспективними для розподільних мереж великої потужності [2].

Найперспективнішою з технічної та економічної точки зору вважається технологія літій-іонних батарей. Вони демонструють високу енергетичну щільність (90–190 Вт·год/кг), ККД понад 95% та тривалий термін експлуатації (до 10 000 циклів) залежно від хімічного складу (наприклад, NMC, LFP) [2]. Завдяки зменшенню собівартості виробництва (рис. 1), літій-іонні накопичувачі займають провідні позиції на ринку як для побутових, так і для промислових застосувань.

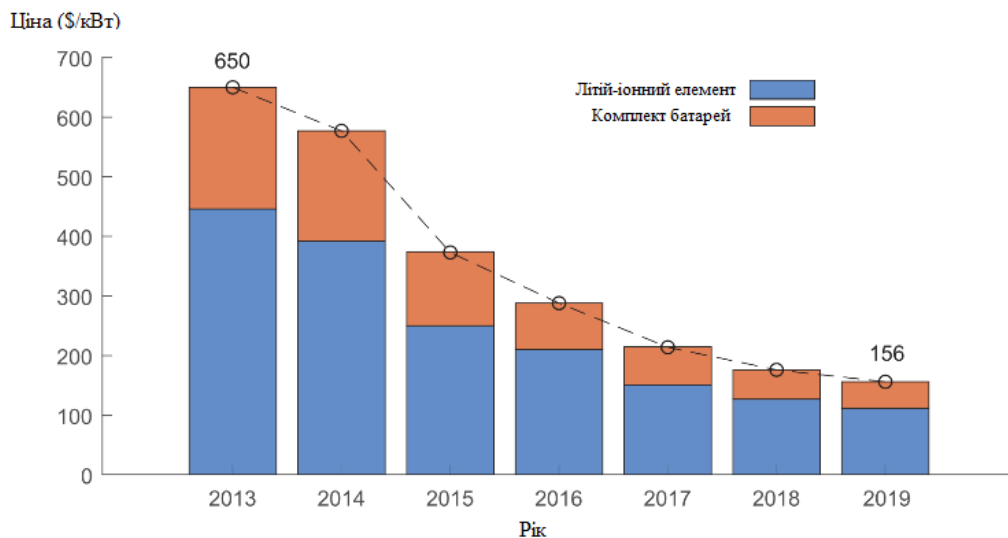


Рисунок 2.1 — Зменшення вартості літій-іонних батарей з 2013 по 2019 рік

Також важливо враховувати конструктивні елементи систем накопичення енергії: батарейні модулі, системи керування температурою, захисту, інтерфейсні перетворювачі постійного/змінного струму (DC-AC). Особливу роль відіграє DC-AC перетворювач, що з'єднує ЕНЕ з розподільною мережею та визначає ефективність, якість та надійність передавання енергії.

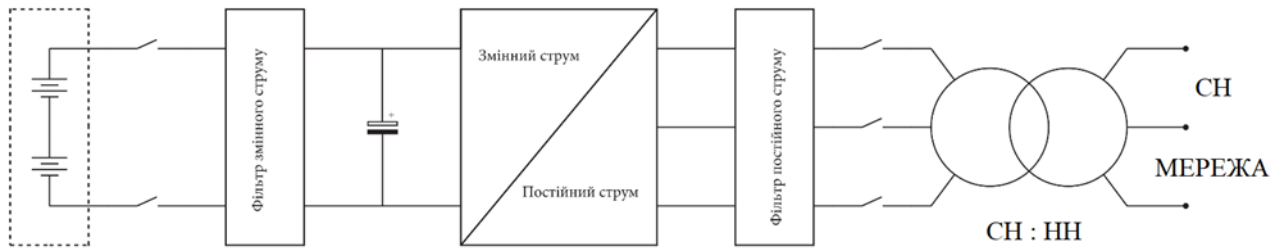


Рисунок 2.2 — Структурна схема системи накопичення енергії з інвертором і трансформатором

У найбільш поширених конфігураціях використовуються двохрівневі інвертори напруги (VSC), які є простими та надійними. Проте у випадках, коли потрібна вища ефективність та менші втрати на перемикання, доцільним є застосування багаторівневих інверторів — наприклад, NPC або ANPC (Neutral Point Clamped, Active Neutral Point Clamped), які демонструють кращі характеристики при високих частотах перемикання [2].

Ключовим параметром для порівняння різних електрохімічних технологій є співвідношення між щільністю енергії, вартістю, кількістю циклів заряду-розряду та ефективністю. Це дозволяє оцінити доцільність застосування тієї чи іншої технології в контексті розподільної мережі 110 кВ, де пріоритетними є надійність, стабільність та економічність функціонування обладнання.

На рисунку 2.3 представлено порівняльні характеристики трьох поширених типів літій-іонних батарей: на основі фосфату заліза (LFP), нікелю-марганцю-кобальту (NMC) та нікелю-алюмінію-кобальту (NCA). З рисунка видно, що технологія NMC має найкраще поєднання характеристик і є лідером у галузі як стаціонарних, так і мобільних систем зберігання енергії [2].

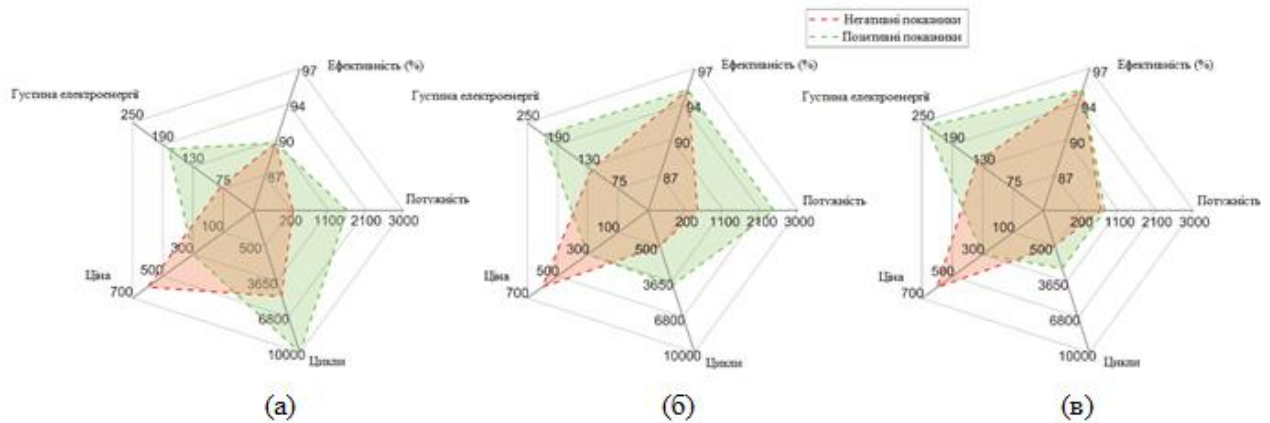


Рисунок 2.3 — Характеристики різних технологій літій-іонних батарей:

(а) залізофосфат літію,

(б) нікель-марганець-кобальт літію та (в) нікель-літій алюмінієвий кобальт

Окрему увагу слід приділити динамічним характеристикам ЕНЕ. Наприклад, час відгуку на зміну навантаження у літій-іонних систем — менше 1 секунди. Це забезпечує можливість швидкої підтримки частоти та напруги в розподільній мережі. У поєднанні з високим ККД це робить їх придатними для надання спектра системних послуг, таких як регулювання напруги, згладжування піків навантаження (peak shaving), компенсація реактивної потужності тощо.

Також варто звернути увагу на зміну ролі інверторів у структурі накопичувачів. Інвертори виконують не тільки функцію перетворення енергії, а й дозволяють реалізовувати складні стратегії керування — від простого заряд/розряд до участі в ринках системних послуг. Наприклад, використання багаторівневих інверторів дозволяє зменшити втрати потужності та гармоніки, що особливо актуально для середньої напруги, як у випадку з мережею 110 кВ [2].

Оцінка втрат у інверторах різних типів показує, що трьохрівневі схеми, особливо NPC та ANPC, мають нижчі втрати при високих частотах комутації. Це забезпечує вищу ефективність роботи всієї системи накопичення енергії, а також збільшує її термін служби, знижуючи теплове навантаження на компоненти. Додатково, на рис. 2.1 показано, як зниження вартості літій-іонних батарей

вплинуло на зменшення загальної собівартості систем накопичення енергії, що є важливим економічним чинником [2].

Крім того, структура витрат у складі всієї системи демонструє, що з роками частка витрат на інвертор (Power Conditioning System, PCS) зростатиме, оскільки вартість самих батарей знижується. Тому при проєктуванні системи накопичення для мережі 110 кВ важливо звертати увагу на вибір інверторної частини не менше, ніж на вибір типу батарей [2].

## 2.2 Можливості використання ЕНЕ в розподільних мережах

Зростаюча кількість розосереджених джерел енергії (ВДЕ), таких як сонячні та вітрові електростанції, а також нові типи навантажень (електромобілі, теплові насоси), ускладнюють підтримку стабільної роботи розподільних мереж. У цьому контексті електрохімічні накопичувачі енергії (ЕНЕ) стали важливим елементом для забезпечення гнучкості та надійності електропостачання. Їхня здатність зберігати енергію та оперативно змінювати режим роботи дозволяє покращити якість електроенергії, зменшити втрати та підвищити енергоефективність мережі [3].

ЕНЕ можуть бути інтегровані в розподільні мережі для реалізації низки технічних функцій, серед яких:

1. Регулювання пікових навантажень (peak shaving) – завдяки здатності швидко віддавати накопичену енергію в години максимального споживання, ЕНЕ дозволяють зменшити навантаження на трансформатори, лінії та інше обладнання, що подовжує термін його служби. Як зазначено у [2], така функція також сприяє відтермінуванню дороговартісних заходів з реконструкції мережі.
2. Згладжування профілю навантаження (load leveling) – шляхом накопичення енергії в періоди низького попиту та її вивільнення у пікові години ЕНЕ допомагають вирівнювати графік навантаження, що веде до зниження технічних втрат електроенергії.

3. Компенсація реактивної потужності та регулювання напруги – ЕНЕ можуть виступати в ролі джерел або споживачів реактивної потужності, підтримуючи рівень напруги в допустимих межах. Це особливо актуально для розподільних мереж 110 кВ, де стабільність напруги має вирішальне значення для споживачів промислового та соціального сектору [3].

4. Підвищення надійності енергопостачання – у випадку аварійних ситуацій або відключень, накопичувачі можуть забезпечити тимчасове живлення критично важливих навантажень, а також сприяти реалізації режимів «чорного пуску» (black start) [2].

На рис. 2.4 представлено типові системні послуги, які можуть забезпечувати накопичувачі енергії в розподільних мережах. Вони класифіковані за шкалою часу реагування та характером навантаження (енергетичні або потужнісні сервіси).

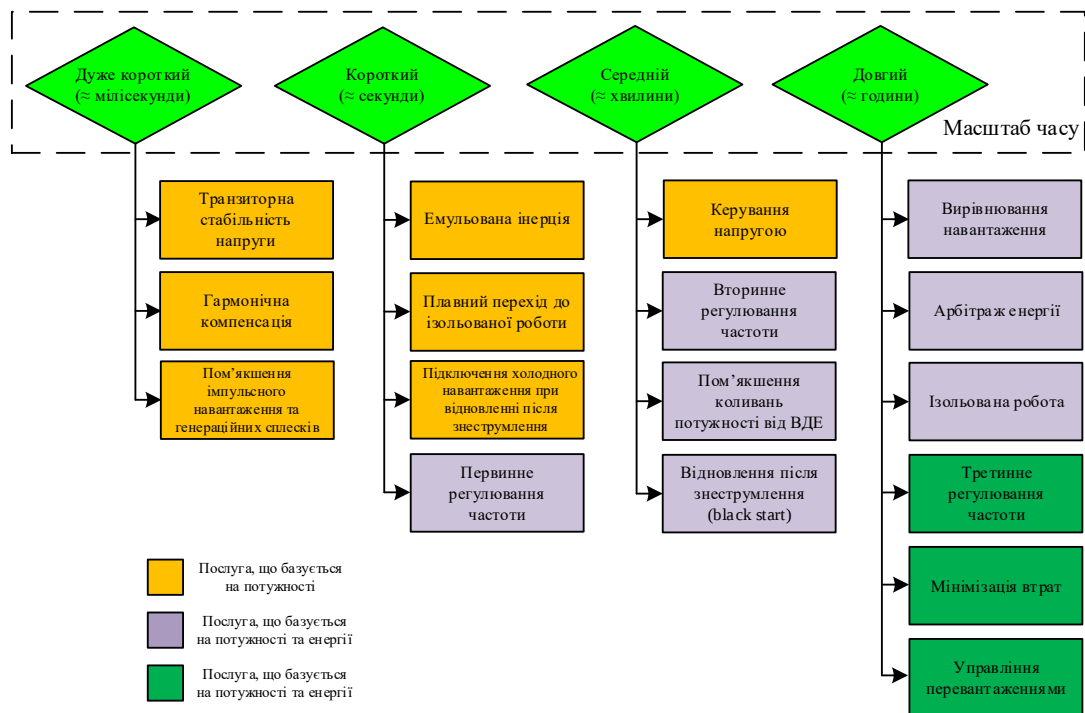


Рисунок 2.4 — Класифікація енергетичних послуг за часом реагування та типом ресурсу

ЕНЕ є також ефективним інструментом для інтеграції відновлюваних

джерел енергії. Завдяки можливості компенсувати нестабільне генерування ВДЕ, накопичувачі забезпечують прогнозованість потоків енергії в мережі, що значно полегшує роботу операторів систем розподілу (ОСР) [3].

Крім технічних переваг, накопичувачі відіграють економічну роль. Наприклад, можливість енергетичного арбітражу дозволяє ОСР або енергопостачальникам купувати електроенергію за низькою ціною в періоди надлишку виробництва і продавати її під час пікових навантажень, що створює нові джерела прибутку [2].

Іншим напрямком є участь ЕНЕ у частотному регулюванні. Завдяки швидкому часу відгуку (менше 1 с), вони можуть брати участь у первинному регулюванні частоти.

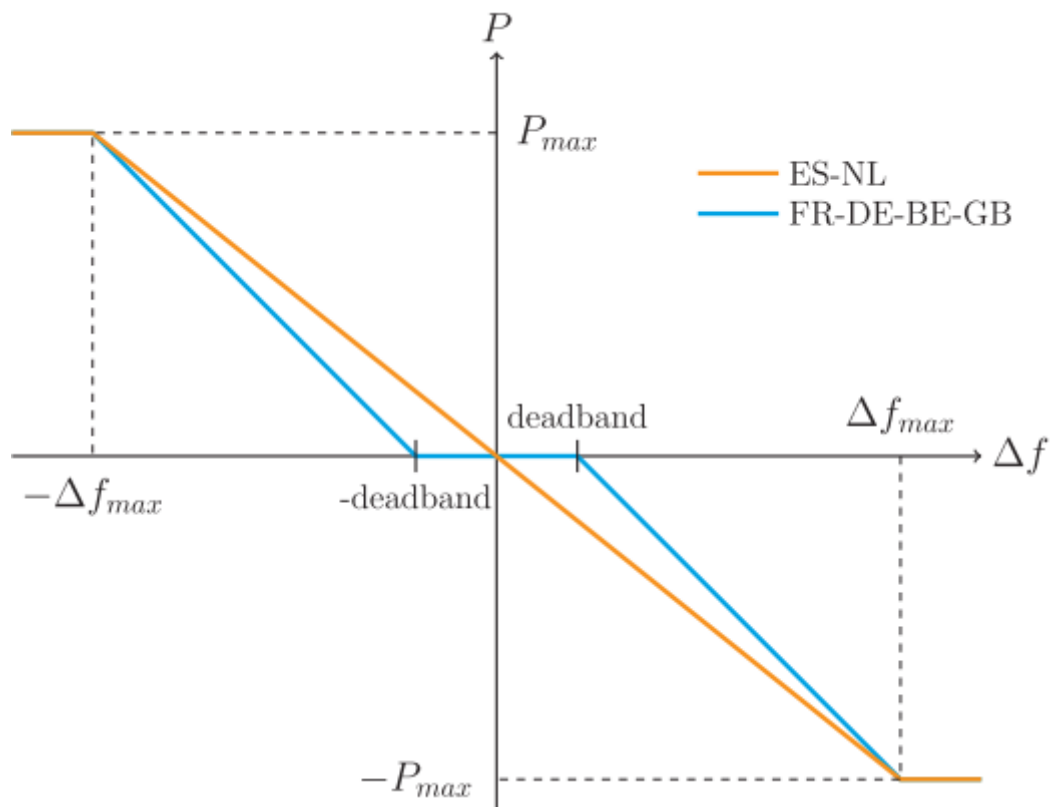


Рисунок 2.5 — Криві P-f для основного регулювання частоти

Важливим напрямком розвитку систем накопичення енергії є впровадження мультифункціональних режимів роботи, коли один накопичувач одночасно забезпечує декілька системних послуг. Такий підхід дозволяє підвищити економічну ефективність ЕНЕ та скоротити термін окупності

інвестицій. Наприклад, один і той самий пристрій може одночасно виконувати згладжування піків навантаження, регулювання напруги та надавати резерв для первинного регулювання частоти [2].

У статті [3] зазначається, що для ефективної реалізації таких режимів потрібне використання спеціалізованих алгоритмів управління, які можуть адаптивно змінювати пріоритети виконання функцій залежно від стану мережі та економічної доцільності. Особливої уваги потребує розробка динамічних моделей ЕНЕ, які дозволяють враховувати обмеження по напрузі, струму, температурі та стану заряду (SoC).

Інтеграція накопичувачів у системи керування типу SCADA та EMS (Energy Management Systems) є необхідною умовою для забезпечення гнучкого реагування на зміну стану мережі. Це передбачає обмін телеметричною інформацією в режимі реального часу, можливість дистанційного управління режимами заряду/розряду та адаптивне коригування алгоритмів регулювання в залежності від стану системи.

На практиці ефективність роботи ЕНЕ в розподільній мережі залежить від правильного вибору місця встановлення та потужності пристрою. Дослідження показують, що розташування накопичувача в безпосередній близькості до джерел генерації ВДЕ або в кінцевих точках ліній дозволяє максимізувати ефект від регулювання напруги та мінімізувати втрати [3]. Наприклад, на рис. 2.7 показано, як введення ЕНЕ в різних точках мережі впливає на профіль напруги. Схема мережі представлена на рис. 2.6.

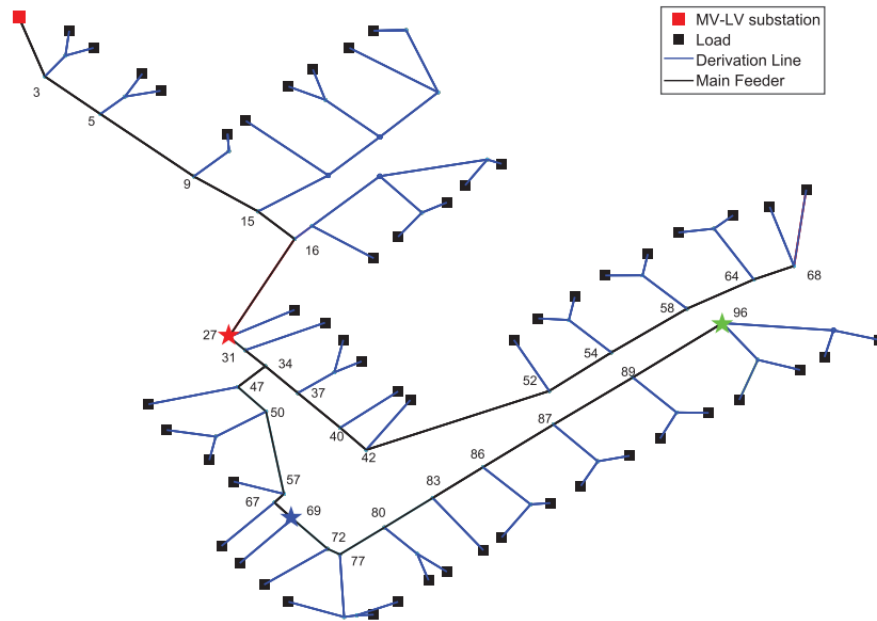


Рисунок 2.6 — Схема європейського тестового фідера

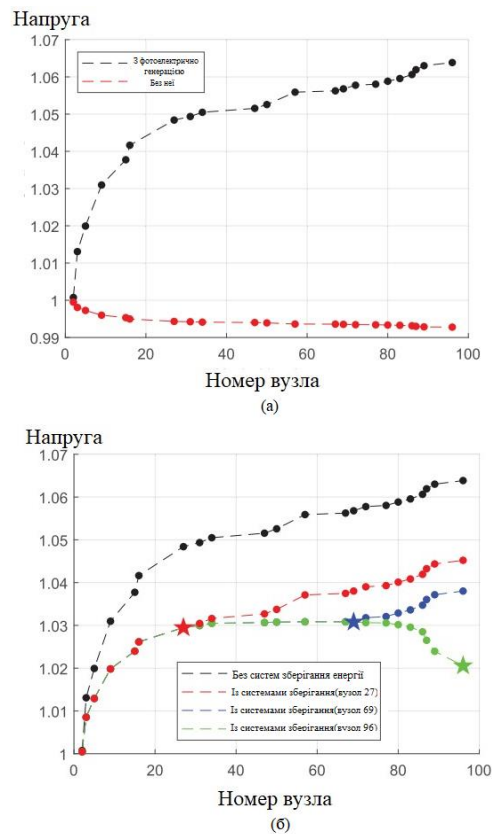


Рисунок 2.7 – Профілі напруги вздовж мережі: (а) з генерацією PV та без нього та (б) з генерацією PV та з накопичувачами, що використовуються для зменшення над напругою накопичувачі розташовані у вузлі, позначеному зірочкою, номери вузлів відповідають нумерації

Попри технологічні переваги, впровадження накопичувачів у розподільні мережі стикається з рядом бар'єрів:

- Висока початкова вартість обладнання, особливо для великих інсталяцій.
- Обмежений термін служби батарей у разі високої частоти циклів.
- Недостатньо розроблена нормативна база та відсутність механізмів компенсації для ОСР за інтеграцію ЕНЕ.
- Відсутність моделей ринку, що враховують мультифункціональність накопичувачів (наприклад, одночасне надання послуг регулювання та арбітражу) [3].

Крім того, одним із важливих напрямків є створення економічних моделей, що враховують змінну вартість електроенергії на ринку, тарифні стимули, операційні витрати та вартість деградації батарей. У публікаціях [2] підкреслюється, що лише при достатньо високій вартості електроенергії або за умов додаткової винагороди від регуляторів, накопичувачі можуть бути економічно доцільними.

Проте, за наявності таких умов, прогнозується значне зростання обсягів впровадження ЕНЕ в розподільні мережі. Більше того, зниження вартості літій-іонних технологій рис. 2.1 та розвиток ринку системних послуг відкривають перспективу для масового впровадження накопичувачів у мережах середньої напруги.

У підсумку, електрохімічні накопичувачі енергії в розподільних мережах 110 кВ можуть не лише забезпечити підвищення енергоефективності, а й стати фундаментальним компонентом розумної електроенергетичної інфраструктури (Smart Grid). Для цього необхідно вдосконалювати алгоритми керування, нормативну базу та економічні моделі, що визначають доцільність інтеграції таких систем

### 2.3 Вплив ЕНЕ на втрати в мережі

Однією з найважливіших технічних переваг впровадження електрохімічних накопичувачів енергії (ЕНЕ) у розподільні мережі є зменшення втрат електроенергії. Втрати активної потужності виникають у кожному елементі електричної мережі — трансформаторах, повітряних та кабельних лініях, комутаційних пристроях — і прямо залежать від величини струму, який протікає мережею. У класичній топології розподільних мереж, де потік електроенергії є переважно односпрямованим — від вузла генерації до споживача — втрати мають усталений характер і зростають при збільшенні навантаження. Проте з впровадженням децентралізованої генерації, зокрема з використанням відновлюваних джерел енергії, характер енергетичних потоків у мережі змінився. Це спричинило потребу у використанні нових технічних засобів для стабілізації режимів і зменшення втрат. Серед таких засобів провідну роль відіграють ЕНЕ.

Електрохімічні накопичувачі дозволяють частково або повністю задовольнити споживання електроенергії у певному вузлі, тим самим зменшуючи необхідність передавання енергії на великі відстані від централізованих джерел живлення. Це призводить до зниження струму в лініях і, відповідно, до зменшення активних втрат, які, як відомо, пропорційні квадрату струму. Зменшення навантаження на трансформатори та фідери також покращує їхній температурний режим, що позитивно впливає на довговічність обладнання і рівень втрат. Найбільший ефект досягається, коли ЕНЕ розташовані ближче до кінцевих точок живлення — у місцях з максимальними втратами, спричиненими довгими відгалуженнями мережі з високим питомим опором [3].

Дослідження, проведені у [2], підтверджують, що застосування накопичувачів енергії для зменшення пікових навантажень дозволяє зменшити середньодобові втрати електроенергії на 10–20% у мережах середньої напруги. Найбільше це проявляється у випадках, коли графік навантаження має різкі добові коливання, а виробництво від ВДЕ не збігається з моментами

максимального попиту. На рис. 2.6 зображено, як розміщення ЕНЕ у різних точках розподільної мережі дозволяє змінити профіль напруги, що опосередковано впливає на величину втрат. Завдяки зменшенню надлишкової напруги в окремих вузлах, можна уникнути перевантажень та зменшити втрати на реактивні струми.

Іншим важливим аспектом є зменшення втрат, пов'язаних із потоками реактивної потужності. ЕНЕ здатні генерувати або споживати реактивну потужність за допомогою інверторів, якими вони підключаються до мережі. Таким чином, вони можуть компенсувати реактивну потужність у місці її споживання, що знижує повні струми в лініях. Це особливо актуально у сільських та промислових мережах, де коефіцієнт потужності часто відрізняється від оптимального. Використання накопичувачів як пристроїв регулювання  $\cos(\varphi)$  дозволяє підтримувати оптимальні режими роботи трансформаторів і зменшувати пов'язані з цим втрати [2].

Згладжування графіка навантаження — ще один ефективний механізм зменшення втрат. У години надлишку генерації (наприклад, вдень — від фотоелектричних станцій) накопичувачі поглинають енергію, а у вечірні години або в моменти пікового навантаження — віддають її у мережу. Це дозволяє вирівняти профіль навантаження трансформаторів та ліній і забезпечити їх роботу в оптимальному режимі. Таке згладжування сприяє зниженню втрат, зумовлених перевантаженням, а також підвищує стабільність частоти та напруги в мережі.

Значна частина сучасних досліджень зосереджується на моделюванні впливу електрохімічних накопичувачів на втрати в розподільній мережі. В роботі [3] пропонується формалізація задачі оптимізації режимів роботи ЕНЕ із врахуванням технічних обмежень — напруги, струму, потужності — а також економічних чинників. Математична модель оптимізації базується на методі ідеального струморозподілу, який дозволяє зменшити втрати активної енергії за принципом мінімуму втрат. Такий підхід дозволяє інтегрувати накопичувачі у розподільні мережі у точках, де ефект від зменшення струму буде максимальним.

Особливу увагу приділено розміщенню накопичувачів у топології мережі. Вибір вузлів для установки ЕНЕ здійснюється з урахуванням їхнього впливу на розподіл навантаження, відстань до джерела живлення, потужність трансформаторів, та наявність місцевих генераторів. В публікації [2] показано, що розміщення одного потужного накопичувача в середині мережі не завжди є оптимальним. Більш ефективним може бути використання декількох менших ЕНЕ, розподілених по вузлах з найбільшими втратами. Такий підхід дозволяє більш гнучко реагувати на зміни графіку навантаження та зменшити втрати на локальних ділянках мережі.

Окрім технічного, важливо також враховувати економічний аспект зменшення втрат. Кожна зекономлена МВт·год електроенергії — це не лише зниження витрат на виробництво, а й зменшення навантаження на енергетичну інфраструктуру та екологічний ефект від зниження викидів парникових газів. Саме тому у багатьох країнах Європи та світу впровадження накопичувачів у розподільні мережі підтримується як частина політики декарбонізації енергетики.

Результати моделювання, зокрема наведені в [2], демонструють, що за умови правильної стратегії керування накопичувачами, втрати у мережі можна зменшити до 20–30% у порівнянні з базовим сценарієм без ЕНЕ. Цей ефект особливо яскраво проявляється у мережах з високим рівнем інтеграції ВДЕ та несиметричними навантаженнями.

Узагальнюючи, можна стверджувати, що використання електрохімічних накопичувачів енергії в розподільних мережах напругою 110 кВ є ефективним технічним рішенням для зменшення втрат активної потужності. Це досягається за рахунок зменшення довжини енергетичних потоків, компенсації реактивної потужності, згладжування графіку навантаження та стабілізації напруги. Результати чисельного моделювання підтверджують, що правильно спроектована система накопичення дозволяє значно знизити втрати, забезпечити підвищення енергоефективності, а також підготувати мережу до роботи в умовах інтенсивної децентралізованої генерації. Подальші дослідження мають бути

спрямовані на вдосконалення алгоритмів оптимального розміщення, прогнозування навантажень та адаптивного керування накопичувачами в режимі реального часу.

## 2.4 Оптимізація розміщення та керування електрохімічних накопичувачів енергії

Ефективність впровадження електрохімічних накопичувачів енергії (ЕНЕ) у розподільні мережі значною мірою залежить від правильного вибору їхнього місця розташування та алгоритмів керування режимами заряджання й розряджання. Некоректне розміщення або статичне керування без урахування змінного характеру навантаження може не лише нівелювати очікувану користь, а й спричинити додаткові втрати та дисбаланс у роботі мережі. Саме тому оптимізація топологічного розташування та режимів функціонування ЕНЕ є критично важливим аспектом при їх інтеграції у мережу 110 кВ.

Оптимізаційні задачі щодо розміщення ЕНЕ в електричних мережах зазвичай формулюються як багатокритеріальні, оскільки враховують кілька цілей одночасно — зменшення втрат активної енергії, покращення профілю напруги, мінімізацію витрат на інфраструктуру та підвищення надійності живлення. Як показано в [3], задача розміщення накопичувачів у мережі може бути приведена до ітераційної схеми розрахунку з використанням методу ідеального струморозподілу, який базується на мінімізації загальних втрат потужності. У цьому підході моделюється поведінка кожного вузла мережі з урахуванням активних обмежень за струмом, напругою та потужністю.

Згідно з публікацією [2], оптимальне розміщення накопичувачів не завжди передбачає розміщення їх у вузлах з найбільшим навантаженням. Значно важливішим є врахування топології мережі, рівнів напруги у вузлах, а також розподілу реактивної потужності. Наприклад, у багатьох випадках встановлення ЕНЕ у кінцевих точках розгалужених ліній дозволяє не лише зменшити втрати, а й вирішити проблему падіння напруги, що є поширеною у мережах середньої

напруги. На рис. 2.6 подано схему випробувальної мережі IEEE, яка часто використовується для дослідження впливу ЕНЕ на параметри системи.

Оптимізація режимів роботи накопичувача включає не тільки визначення часу та обсягу заряду і розряду, а й адаптивне управління у відповідь на зміну навантаження, стану мережі та економічних параметрів. У роботі [4] зазначено, що ефективне керування режимами роботи накопичувача може ґрунтуватися на використанні графових методів та принципу найкоротшого шляху з урахуванням обмежень на потужність і ємність батареї. Такий підхід дозволяє знаходити єдиний оптимальний сценарій використання накопичувача, що забезпечує максимальну ефективність у даних умовах.

У сучасних дослідженнях набувають поширення також моделі прогнозного керування (Model Predictive Control, MPC), які дозволяють враховувати очікувані зміни навантаження, генерації ВДЕ та ціни на електроенергію для оптимізації поведінки ЕНЕ у часовому горизонті. Такі системи активно інтегруються у SCADA/EMS платформи операторів систем розподілу і демонструють високу гнучкість в експлуатації. При цьому на практиці доведено, що MPC забезпечує економію втрат енергії до 15% порівняно з традиційними схемами заряд/розряд за фіксованим графіком [2].

Не менш важливим є урахування деградації батарей, яка відбувається при інтенсивному циклічному навантаженні. У зв'язку з цим деякі сучасні моделі оптимізації також включають критерій зменшення зносу батарей або інтегрують вартість їх заміни в загальний економічний функціонал. Як показано у [2], це дозволяє досягнути балансу між технічною ефективністю та експлуатаційною надійністю.

На рис. 2.5 наведено приклад кривих первинного частотного регулювання, що може реалізовуватись за допомогою накопичувачів. Адаптивна стратегія керування за частотою дозволяє накопичувачу не тільки стабілізувати параметри системи, а й уникати непотрібних циклів заряд/розряд у нормальних умовах.

Узагальнюючи, слід зазначити, що оптимізація розміщення та керування ЕНЕ у розподільних мережах є комплексною інженерною задачею, яка потребує

врахування технічних, економічних та експлуатаційних факторів. Найбільш перспективними є підходи, що поєднують математичне моделювання, прогнозування та адаптивне керування з використанням сучасних інформаційно-керуючих систем. Результати багатьох досліджень доводять, що правильно реалізовані стратегії розміщення та експлуатації накопичувачів здатні забезпечити не лише суттєве зниження втрат у мережі, а й підвищення якості електропостачання та економічну доцільність інвестицій у такі системи.

## 2.5 Управління та експлуатація BESS

Система керування батареєю здійснює збір інформації з електрохімічного накопичувача та виконує функції балансування напруги між окремими елементами, захищаючи їх від перевантаження, а також зменшує температурний градієнт, що дозволяє забезпечити рівномірне зношування. Вона визначає рівень заряду та загальний технічний стан акумулятора, передаючи ці параметри до системи енергетичного менеджменту (EMS) — пристрою, що відповідає за контроль роботи накопичувача енергії й його безпеку. Як показано на рисунку 2.7, EMS отримує інформацію з декількох джерел, зокрема від електричних сенсорів у точці приєднання до мережі, метеорологічних прогнозів, даних з енергоринку та команд, що надходять від операторів системи розподілу, передачі, а також агрегаторів. Зібрана інформація обробляється алгоритмом, який генерує цифрові сигнали з опорними параметрами для інвертора, що перетворює струм, і ці сигнали надсилаються на плату керування, котра відповідає за функціонування всієї системи.

На рисунку 2.7 блок із блакитним фоном демонструє структуру керування струмом, побудовану на основі системи накопичення енергії. Окрім цього, система EMS також виконує функцію планування роботи ЕНЕ, а при наявності кількох таких систем — координує взаємодію між різними модулями накопичувачів. Кожен окремий блок ЕНЕ може мати власну автономну систему контролю струму, яка управляє накопиченням енергії, спираючись на локальні

показники, як зображено на рисунку 2.8(а). В якості альтернативи може застосовуватись централізований диспетчерський блок, який здійснює управління окремою частиною енергетичної мережі (рис. 2.8(б)), всією мережею загалом (рис. 2.8(в)), або ж кожен модуль може містити алгоритм ухвалення рішень, який має змогу обмінюватися інформацією з сусідніми блоками — як це зображено на рисунку 2.8(г).

Ці стратегії управління можуть бути класифіковані як локальне, децентралізоване, централізоване та розподілене управління.

Існує кілька типів стратегій керування, які можна поділити на локальне, децентралізоване, централізоване та розподілене управління.

Серед ключових викликів у процесі розробки систем управління для акумуляторних установок — необхідність побудови ефективної комунікаційної інфраструктури, розробка алгоритмів прийняття рішень, а також робота з неточними даними та непередбачуваними відхиленнями у прогнозах.

Комунікаційна інфраструктура може вимагати значних фінансових вкладень, особливо якщо йдеться про великі мережі з великою площею покриття. До того ж, щоб реалізувати ефективну стратегію управління, часто доводиться враховувати високі вимоги до швидкості обміну інформацією, мінімальної затримки та стабільності передачі даних.

Зазвичай системи накопичення енергії (ЕНЕ) використовуються для зменшення коливань, викликаних роботою сонячних панелей, а запропоновані методики адаптовані як для операторів системи розподілу (ОСР), так і для автономного використання окремими пристроями. Водночас, у сфері розробки стратегій керування не існує єдиного домінуючого підходу, який би вважався загальноприйнятим або універсальним.

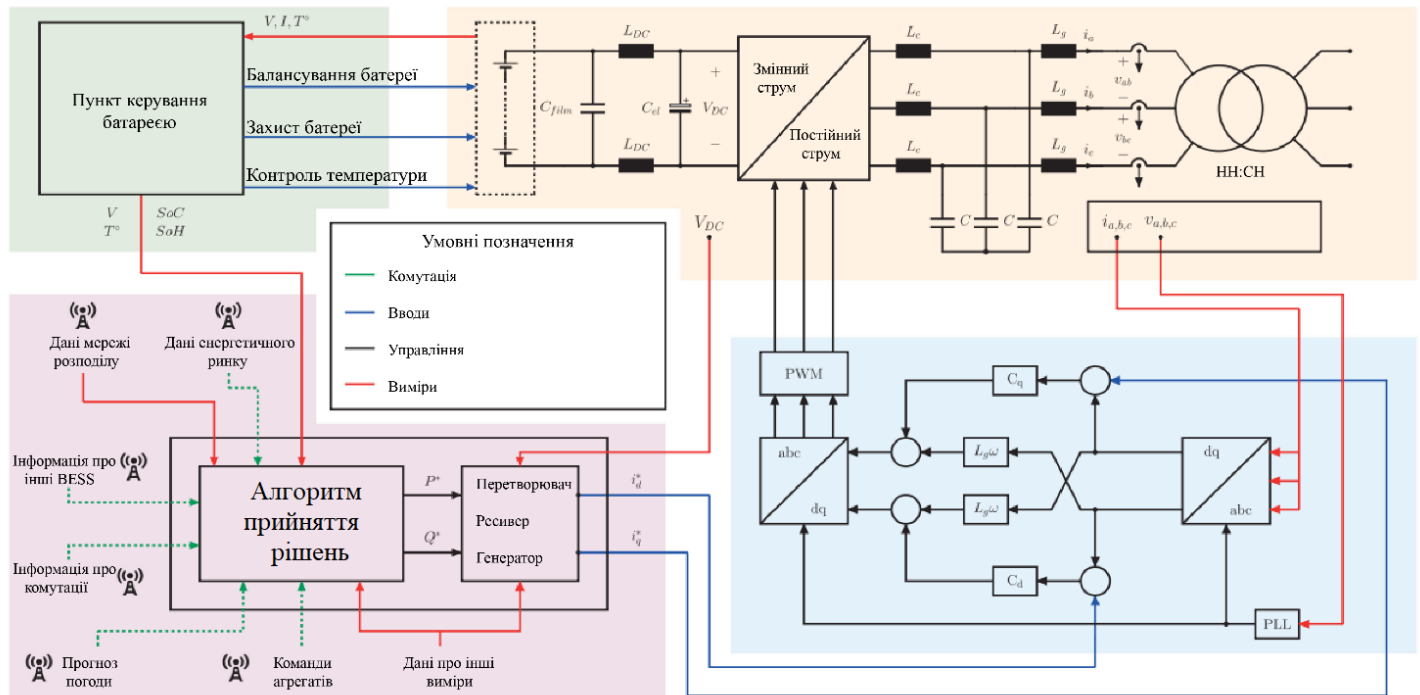


Рисунок 2.7 – Схема і основні компоненти системи накопичення енергії акумулятора

Найбільш розповсюдженим типом акумуляторних технологій у складі ЕНЕ залишаються свинцево-кислотні батареї. Аналіз численних електричних моделей свідчить про те, що реальні характеристики можуть суттєво відрізнятися від очікуваних на етапі проектування. Оптимізація прогнозування роботи накопичувачів виконується як із залученням детальної моделі у вигляді еквівалентної електричної схеми, так і без врахування точної моделі системи зберігання. Результати досліджень показують: ігнорування точного опису ЕНЕ призводить до скорочення її експлуатаційного ресурсу. Це ще раз підкреслює необхідність використання точних моделей для ефективного керування та подовження терміну служби акумуляторів.

Щодо вхідних даних для алгоритмів управління, у більшості досліджень рішення приймаються на основі локальних електричних вимірювань. Проте, в окремих випадках до уваги беруть також метеорологічну інформацію. Іноді аналізуються варіанти повного контролю над мережею для реалізації централізованого чи скоординованого керування. Водночас такий підхід може

виявитися складним у впровадженні або економічно не вигідним, зважаючи на велику кількість мереж з низькою напругою, обмеженим рівнем автоматизації та недостатньою кількістю моніторингових пристроїв.

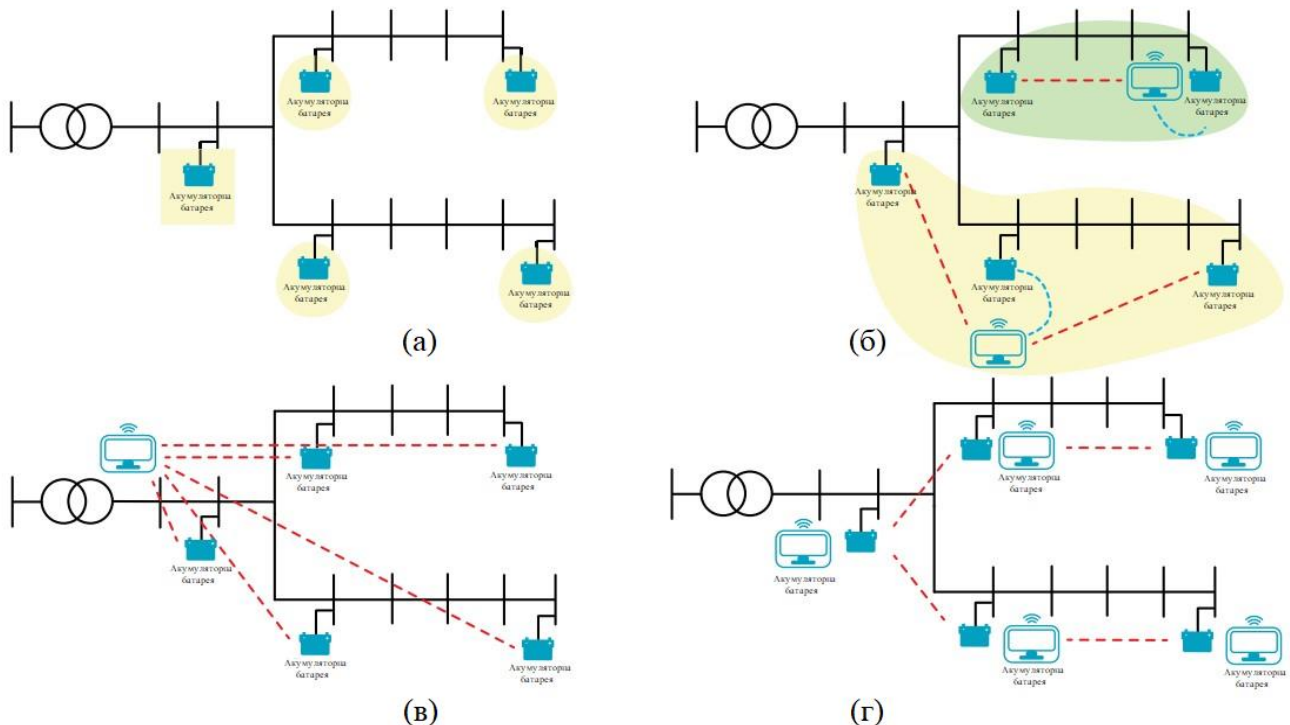


Рисунок 2.8 – Приклад стратегій управління ЕНЕ: а) локальне управління, б) децентралізоване управління, в) централізоване управління та г) розподілене управління

Другий підхід, хоча й потребує більше обчислювальних ресурсів і є складнішим у реалізації, виявляється найкраще узгодженим із поточним технічним рівнем розподільчих електричних мереж. Ще одне цікаве спостереження, отримане на основі аналізу літературних джерел, полягає в тому, що при використанні розподіленої стратегії управління різні модулі обмінюються даними про рівень заряду, щоб коректно розподіляти регулюючу потужність. Як уже зазначалося раніше, функція планування роботи систем накопичення енергії покладена на EMS.

Інформація з енергетичного ринку, рівень генерації з відновлюваних джерел енергії, а також мережеві параметри, такі як напруга у вузлових точках та струми в лініях, можуть бути передбачені лише частково. У цьому контексті

планування роботи ґрунтується на поєднанні поточних, історичних даних та прогнозів. Проте під час роботи можуть надходити дані в реальному часі або уточнені прогнози, які здатні змінити оптимальне рішення щодо режиму роботи системи.

Один із підходів, що добре себе зарекомендував у таких умовах — це модельно-прогнозне управління. Цей метод ефективно застосовується для вирішення задач, пов'язаних з невизначеністю, а також у процесі багатоперіодної оптимізації при плануванні режимів ЕНЕ. У подальших дослідженнях доцільно ретельно враховувати вплив непередбачуваності та похибок у прогнозах для забезпечення надійності та стійкості системи.

## 2.6 Інтеграція ЕНЕ у систему 110 кВ

Інтеграція електрохімічних накопичувачів енергії (ЕНЕ) у розподільну мережу напругою 110 кВ відкриває нові технічні можливості для підвищення ефективності, стабільності та надійності електропостачання. Водночас цей процес пов'язаний із рядом викликів, як технічного, так і економічного характеру. З огляду на швидкий розвиток технологій зберігання енергії та динамічні зміни на енергетичних ринках, важливо проаналізувати як існуючі перешкоди, так і перспективи масштабного впровадження ЕНЕ у мережах середньої та високої напруги.

Першим викликом, з яким стикаються оператори систем розподілу, є відсутність стандартизованих технічних рішень для інтеграції ЕНЕ у мережі 110 кВ. На відміну від побутових або мікромережевих застосувань, де технологія накопичення енергії вже пройшла стадію комерціалізації, у сфері середньої напруги застосування накопичувачів ще потребує глибокої адаптації. Вимагається узгодження параметрів інверторів, трансформаторного обладнання, систем автоматики та захисту для забезпечення безпечної та ефективної взаємодії накопичувача з елементами мережі [3].

Крім того, високі технічні вимоги до систем ізоляції та захисту створюють

складнощі для впровадження ЕНЕ у мережах напругою понад 35 кВ. У цьому контексті важливою є проблема вибору технологічного рішення, яке забезпечить надійність комутації, стійкість до перенапруг та відповідність вимогам селективності у системі релейного захисту. Для цього часто застосовуються спеціальні трансформаторні схеми, які дозволяють безпосередньо з'єднувати накопичувач із шиною 110 кВ через інверторний блок

Окремої уваги заслуговує питання керування накопичувачем у реальному часі. У мережі 110 кВ, яка обслуговує великі споживачі та може бути частиною кількох регіональних секцій, важливою є узгодженість між локальними системами автоматизації (у тому числі SCADA/EMS) та алгоритмами керування накопичувачем. Це передбачає наявність телеметричних каналів, протоколів обміну даними та резервованих каналів керування. Крім того, у випадках інтеграції кількох накопичувачів в різних точках мережі, потрібна реалізація координованих стратегій керування для уникнення суперечливих дій та запобігання перевантаженню мережі.

З економічної точки зору основним викликом є висока капітальна вартість систем накопичення, особливо для інфраструктури, що функціонує на рівні 110 кВ. Хоча ціни на літій-іонні батареї продовжують знижуватись, повна вартість системи з урахуванням інвертора, трансформатора, системи охолодження та монтажу залишається високою. Частка інверторно-перетворювального обладнання та трансформаторів у загальній вартості системи у випадку підключення до 110 кВ суттєво зростає [2].

Разом з тим, впровадження ЕНЕ у систему 110 кВ має значні перспективи. Передусім це можливість резервування живлення критичних об'єктів. У разі аварійного вимкнення ліній або трансформаторів, накопичувач може тимчасово забезпечити енергопостачання окремих вузлів, що особливо важливо для медичних установ, підприємств безперервного циклу та об'єктів критичної інфраструктури. У роботі [3] також підкреслено важливість ЕНЕ для реалізації сценаріїв black start — відновлення живлення в мережі без зовнішніх джерел енергії.

Крім того, у зв'язку з масштабною інтеграцією відновлюваних джерел енергії, зростає значення накопичувачів як інструменту балансування генерації та навантаження. У цьому контексті система 110 кВ може бути платформою для створення місцевих балансуючих ринків, де ЕНЕ будуть виступати активними учасниками. Зокрема, вони зможуть надавати послуги первинного та вторинного регулювання частоти, підтримки напруги, згладжування профілю навантаження — що детально відображено на рис. 2.9 [2].

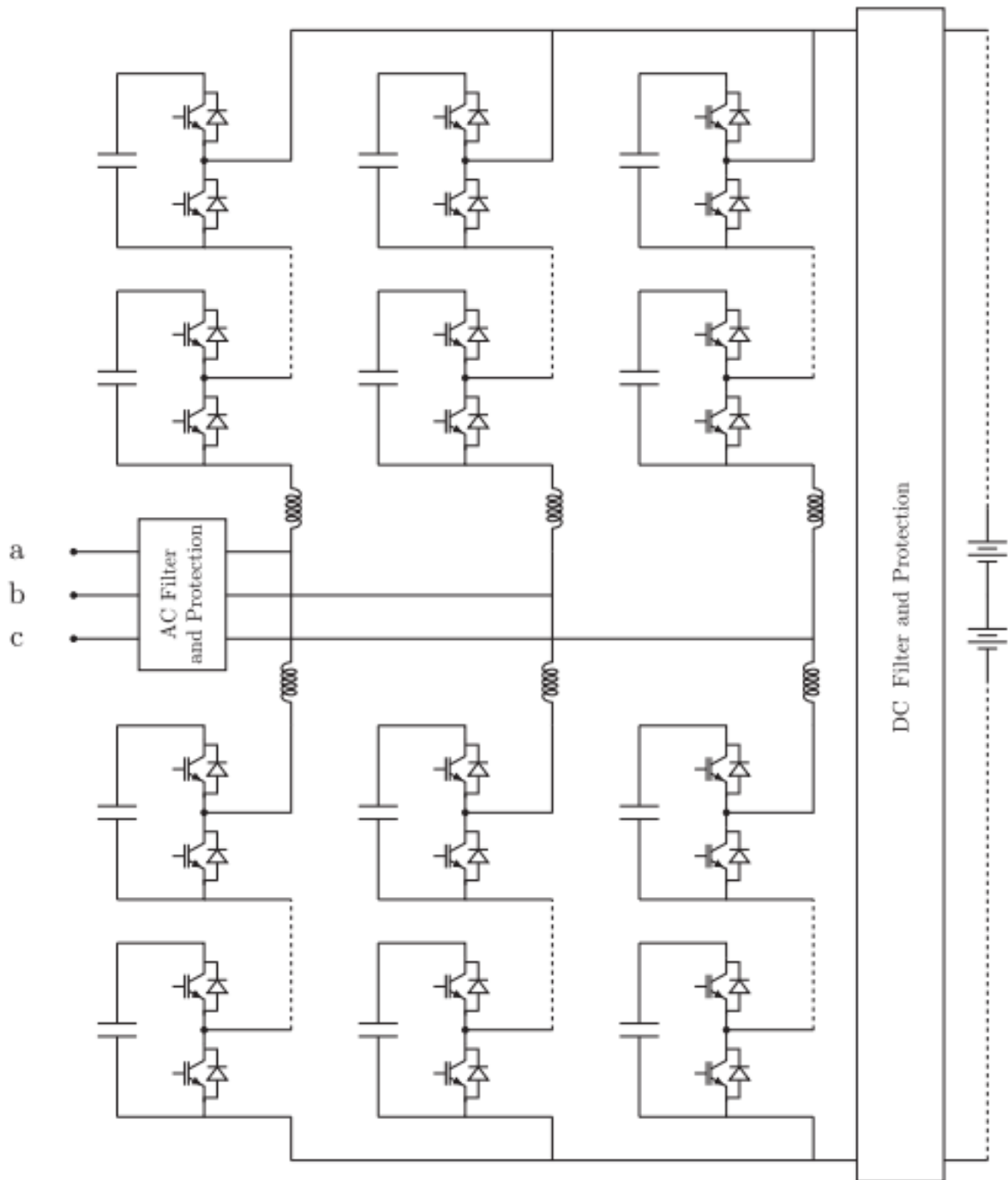


Рисунок 2.9 — Допоміжні послуги, які надає ЕНЕ

На завершення, серед довгострокових перспектив варто відзначити розвиток розумних енергетичних систем (Smart Grid), де накопичувачі енергії стають повноцінними елементами мережевої архітектури. У такій системі вони здатні не лише накопичувати та віддавати енергію, а й взаємодіяти з іншими джерелами, прогнозувати зміну попиту, брати участь у ринках електроенергії та послуг гнучкості. Таким чином, інтеграція ЕНЕ у мережу 110 кВ — це не просто технічна модернізація, а стратегічний крок у напрямку енергетичної трансформації.

### 3 ОЦІНЮВАННЯ ЕКОНОМІЧНОГО ЕФЕКТУ ВПРОВАДЖЕННЯ ЕНЕ В РОЗПОДІЛЬНИХ МЕЕРЕЖАХ АТ «ВІННИЦЯОБЛЕНЕРГО»

#### 3.1 Економічна оцінка впровадження електрохімічних накопичувачів енергії в розподільчих мережах

В об'єднаній енергетичній системі України (ОЕС) зберігається тенденція нерівномірного навантаження. Це стосується понять ранкового, вечірнього максимумів і вплив ВДЕ, при яких спостерігаються пікові навантаження, нічного періоду та періоду між ранковим та вечірнім максимумами, що характеризуються мінімальними та майже рівномірними навантаженнями.

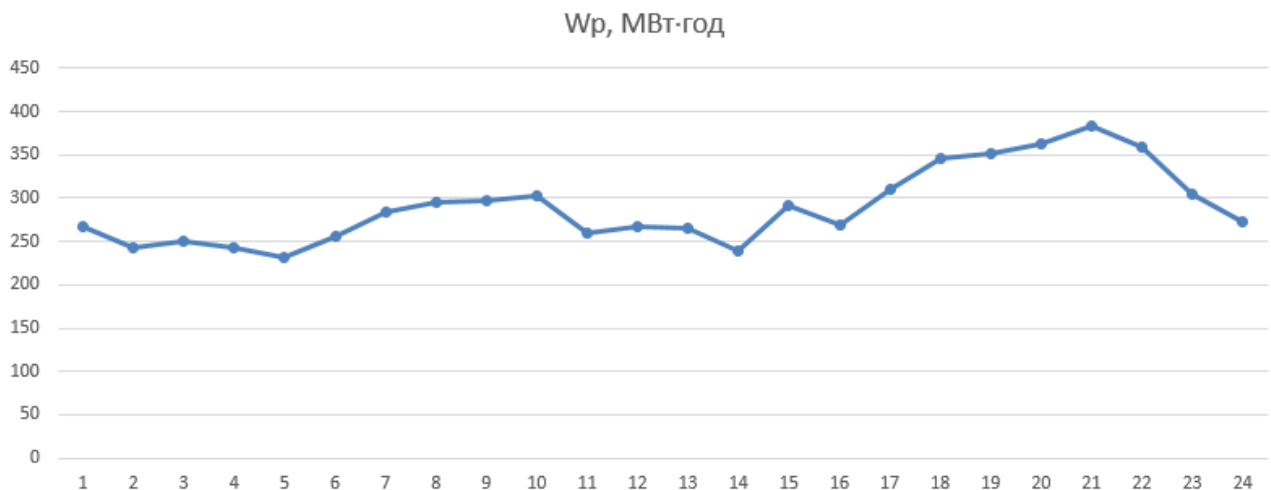


Рисунок 3.1 – Графік відпуску електричної енергії 20.04.2025

На рисунку 3.1 продемонстрований денний графік відпуску електричної енергії, який демонструє нерівномірність навантаження. Нерівномірність навантаження змушує ОСР складати прогноз навантаження для забезпечення безперебійного та безпечного живлення. В сучасних реаліях, в часи, коли попит на ВДЕ зріс, здійснювати відносно точне прогнозування дуже складно. Саме тому, інструментом, що зможе підтримувати нормальний режим роботи системи є ЕНЕ.

На рисунку 3.2 зображені графіки динаміки цін за період 24 годин. Якщо

врахувати зміну ціни на електроенергію продовж доби, то доцільним є заряджання ЕНЕ в піковий період часу та в період найменших і рівномірних навантажень, тоді витрати на електроенергію значно зменшаться, відповідно ЕНЕ працюватиме найбільш ефективно з економічної точки зору.

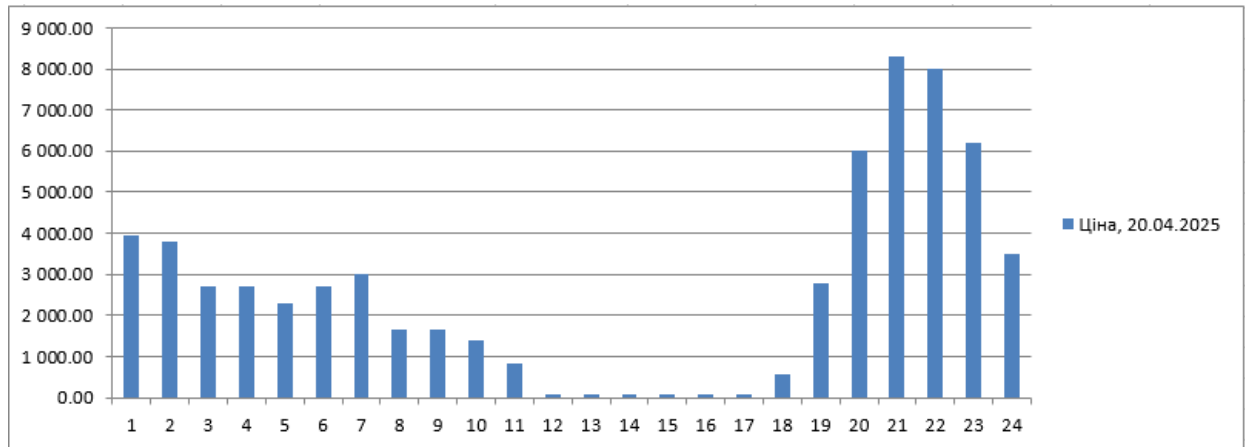


Рисунок 3.2 – Коливання ціни на електроенергію 20.04.2025

В загальному, принцип роботи ЕНЕ простий і зрозумілий. На рис. 3.1 зображений типовий графік споживання електроенергії протягом дня для мереж АТ «Вінницяобленерго». В періоди найменших та найрівномірніших навантажень накопичувачу переходить в режим заряду і накопичує енергію. В час ранкового та вечірнього піку ЕНЕ розряджається і «віддає» електричну енергію в мережу. Варто зауважити, що ЕНЕ може працювати деякий час і в режимі резервного джерела, наприклад, у випадку припинення живлення від основного джерела електроенергії.

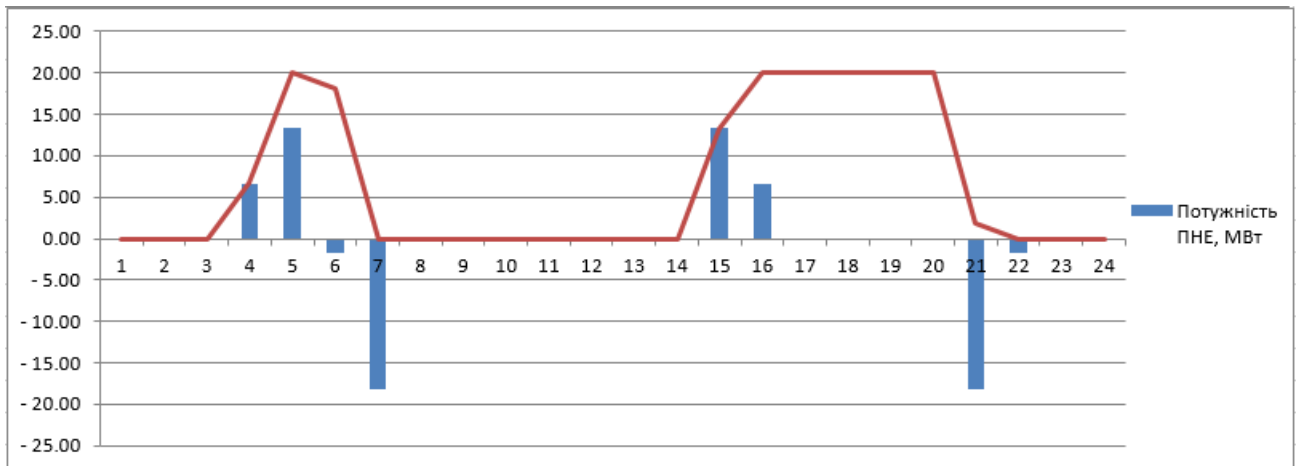


Рисунок 3.3 – Графік заряду-розряду ЕНЕ 20МВт протягом доби 20.04.2025

Для того щоб оцінити доцільність встановлення накопичувачів у мережах ОСР, треба оцінити економічну складову. Для оцінки економічної ефективності в енергетиці використовуються показник рентабельності капіталовкладень, який з урахуванням того, що проект передбачає будівництво енергооб'єктів протягом одного року виглядатиме наступним чином:

$$E'_a = \frac{dB_W - B_{BESS}}{K_{BESS}}. \quad (3.1)$$

де  $K_{ЕНЕ}$  - капіталовкладення в ЕНЕ за рік, тис.грн;

$B_{ЕНЕ}$  - відрахування від капітальних витрат на обслуговування та ремонт ЕНЕ, тис.грн;

$dB_W$  – річне зменшення витрат на закупівлю електроенергії для забезпечення абонентів, тис.грн.

Визначимо річне зменшення витрат на закупівлю електроенергії для забезпечення абонентів як:

$$dB_W = B_{W1} - B_{W2}. \quad (3.2)$$

Де  $B_{W1}$  - витрати на закупівлю електроенергії для заезпечення абонентів до

впровадження ЕНЕ, тис.грн,

$B_{w2}$  – витрати на закупівлю електроенергії для заезпечення абонентів після впровадження ЕНЕ, тис.грн.

Таблиця 3.1 – Дані щодо витрат на закупівлю електроенергії для забезпечення абонентів до впровадження ЕНЕ

| Година | $W_p$ ,<br>(тис. кВт/год.) | $B_w$ ,<br>(тис. грн.) |
|--------|----------------------------|------------------------|
| 1      | 268.013                    | 1 058.56               |
| 2      | 243.445                    | 925.09                 |
| 3      | 250.474                    | 676.28                 |
| 4      | 242.915                    | 655.87                 |
| 5      | 232.383                    | 534.48                 |
| 6      | 256.223                    | 691.80                 |
| 7      | 284.009                    | 852.03                 |
| 8      | 296.045                    | 488.47                 |
| 9      | 297.277                    | 490.51                 |
| 10     | 301.921                    | 422.6894               |
| 11     | 259.308                    | 217.8187               |
| 12     | 267.607                    | 26.7607                |
| 13     | 265.808                    | 25.51757               |
| 14     | 239.675                    | 20.37238               |
| 15     | 291.96                     | 24.52464               |
| 16     | 268.773                    | 22.57693               |
| 17     | 310.928                    | 29.84909               |
| 18     | 345.649                    | 197.3656               |
| 19     | 350.626                    | 974.7403               |
| 20     | 362.7                      | 2176.2                 |
| 21     | 383.691                    | 3184.635               |
| 22     | 358.602                    | 2868.816               |
| 23     | 304.017                    | 1884.905               |
| 24     | 272.772                    | 954.702                |

Виходячи з даних таблиці 3.1, отримаємо витрати на закупівлю електроенергії для забезпечення абонентів до впровадження ЕНЕ 1 день

просумувавши значення за кожну годину:

$$B_{w1} = 19404.56 \text{ (тис. грн.)}. \quad (3.3)$$

Таблиця 3.2 – Дані щодо витрат на закупівлю електроенергії для забезпечення абонентів після впровадження ЕНЕ

| Година | Wp, Роб.день (тис. кВт/год.) | Bw, (тис. грн.) |
|--------|------------------------------|-----------------|
| 1      | 268.013                      | 1 058.56        |
| 2      | 243.445                      | 925.09          |
| 3      | 250.474                      | 676.28          |
| 4      | 242.915                      | 673.87          |
| 5      | 232.383                      | 565.15          |
| 6      | 256.223                      | 686.89          |
| 7      | 284.009                      | 797.48          |
| 8      | 296.045                      | 488.47          |
| 9      | 297.277                      | 490.51          |
| 10     | 301.921                      | 422.6894        |
| 11     | 259.308                      | 217.8187        |
| 12     | 267.607                      | 26.7607         |
| 13     | 265.808                      | 25.51757        |
| 14     | 239.675                      | 20.37238        |
| 15     | 291.96                       | 25.64464        |
| 16     | 268.773                      | 23.13693        |
| 17     | 310.928                      | 29.84909        |
| 18     | 345.649                      | 197.3656        |
| 19     | 350.626                      | 974.7403        |
| 20     | 362.7                        | 2176.2          |
| 21     | 383.691                      | 3033.726        |
| 22     | 358.602                      | 2854.271        |
| 23     | 304.017                      | 1884.905        |
| 24     | 272.772                      | 954.702         |

Виходячи з даних у таблиці 3.2, отримаємо витрати на закупівлю електроенергії для забезпечення абонентів після впровадження ЕНЕ за 1 день просумувавши значення за кожну годину:

$$B_{w2} = 19230.00 \text{ (тис. грн.)}. \quad (3.4)$$

Підставивши отримані значення  $B_{w1}$  і  $B_{w2}$  у вираз (3.1) отримаємо:

$$dB_w = 19\,404.561 - 9\,230.00 = 174.56 \text{ (тис. грн.)}. \quad (3.5)$$

Потрібно врахувати, що згідно вихідних даних розглядається встановлення накопичувачів сумарною ємністю 20 МВт год (5 контейнерів по 4 МВт), що вартує 210 000 тис. грн (за курсом 1\$=42 грн), звідси:

$$K_{BESS} = 210\,000 \text{ (тис. грн.)}. \quad (3.6)$$

Відрахування від капітальних витрат на обслуговування та ремонт ЕНЕ визначається як:

$$B_{BESS} = \frac{K_{BESS} \cdot P_{BESS} \%}{100}. \quad (3.7)$$

Де  $K_{ЕНЕ}$  - капіталовкладення в ЕНЕ за рік, які визначено в (3.6),

$P_{ЕНЕ} \%$  - норма щорічних відрахувань на ремонт та обслуговування електротехнічного устаткування ЕНЕ (8%).

Здійснивши підстановку значень капіталовкладень в ЕНЕ та норм щорічних відрахувань отримаємо:

$$B_{BESS} = \frac{210\,000 \cdot 8}{100} = 16\,800 \text{ (тис. грн.)}. \quad (3.8)$$

Амортизаційні відрахування для ЕНЕ визначається як:

$$A_{BESS} = \frac{K_{BESS} \cdot P_A \%}{100}. \quad (3.9)$$

$P_A\%$  - норма щорічних відрахувань на амортизацію електротехнічного устаткування ЕНЕ (10%).

Здійснивши підстановку значень капіталовкладень в ЕНЕ та норм щорічних відрахувань отримаємо:

$$A_{BESS} = \frac{210\,000 \cdot 10}{100} = 21000 \text{ (тис. грн.)}. \quad (3.10)$$

Використавши отримані значення, а саме капіталовкладення в ЕНЕ, відрахувань від капітальних витрат і надходжень електроенергії в мережу отримаємо:

$$E'_a = \frac{21\,000 + 37\,207.17 - 16\,800.00}{210\,000} = 0.197. \quad (3.11)$$

Виходячи з цього приведений термін окупності становить:

$$T_a = \frac{1}{E'_a}; \quad (3.12)$$

$$T_a = \frac{1}{0.197} = 5.07.$$

З результатів розрахунків можна зробити висновок, про достатню ефективність розробленого проекту інтеграції ЕНЕ, що підтверджується високою рентабельністю капітальних затрат, та достатньо низьким терміном окупності. Для підвищення рентабельності подібних заходів слід використовувати зазначені пристрої для надання послуг з балансування

потужності у енергосистемі. Це забезпечить додаткове надходження від їх експлуатації.

Таблиця 3.3 – Порівняння прибутку в тис. грн/рік з встановленням додатковими ЕНЕ

|                         |         |         |         |         |          |
|-------------------------|---------|---------|---------|---------|----------|
| Р (МВт)                 | 20.00   | 32.00   | 44.00   | 52.00   | 60.00    |
| Прибуток (тис. грн/рік) | 37207.2 | 59027.5 | 80847.8 | 95394.6 | 109941.5 |
| Т (років)               | 5.07    | 5.11    | 5.13    | 5.14    | 5.14     |

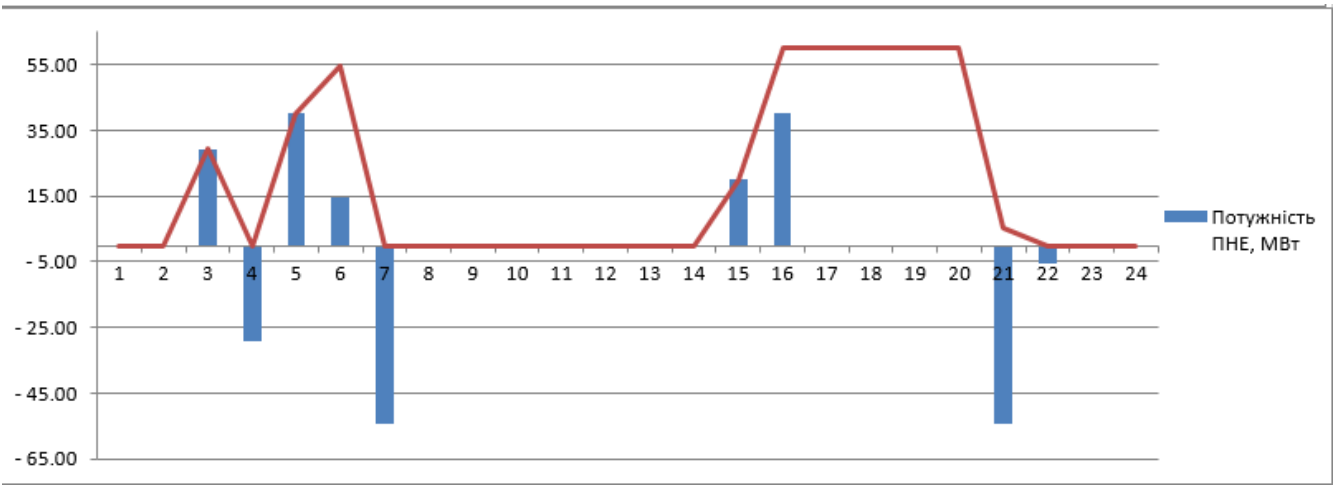


Рисунок 3.4 – Графік заряду-розряду ЕНЕ 60МВт протягом доби 20.04.2025

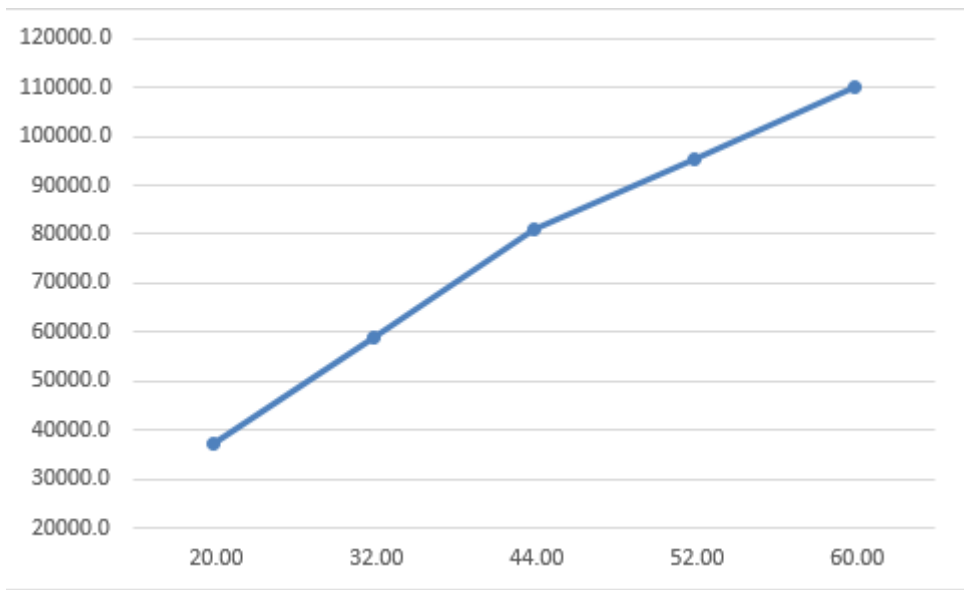


Рисунок 3.5 – Графік прибутку із додатковими ЕНЕ протягом доби 20.04.2025

Проведений аналіз економічної ефективності впровадження електрохімічних накопичувачів енергії (ЕНЕ) у розподільчих мережах АТ «Вінницяобленерго» підтвердив їх високу ефективність. Завдяки здатності ЕНЕ накопичувати енергію в періоди низької вартості електроенергії та віддавати її під час пікових навантажень, досягається суттєве зменшення витрат на закупівлю електроенергії. Рентабельність капітальних вкладень у ЕНЕ потужністю 20 МВт досягає 29%, а термін окупності становить 5.07 років, що свідчить про економічну привабливість проєкту.

Дослідження залежності прибутку від потужності накопичувачів (20–60 МВт) показало, що зі зростанням потужності ЕНЕ прибуток пропорційно збільшується (з 37207.2 тис. грн/рік для 20 МВт до 109941.5 тис. грн/рік для 60 МВт), при цьому термін окупності залишається стабільним (5.07–5.14 років). Це підтверджує доцільність масштабування систем накопичення енергії. Для додаткового підвищення рентабельності рекомендується використовувати ЕНЕ для надання послуг із балансування потужності в енергосистемі, що забезпечить зростання доходів від їх експлуатації.

### 3.2 Оцінка прибутку від експлуатації ЕНЕ потужністю 40 МВт на початку квітня 2025 року

У попередньому підрозділі було проведено економічну оцінку впровадження електрохімічних накопичувачів енергії (ЕНЕ) у розподільчих мережах АТ «Вінницяобленерго», що підтвердило їх високу рентабельність і доцільність використання для балансування навантаження. Однак для повнішого розуміння економічного ефекту важливо проаналізувати короткострокові результати експлуатації ЕНЕ у реальних умовах.

Цей підрозділ присвячений розрахунку прибутку від використання ЕНЕ потужністю 40 МВт протягом перших двох тижнів квітня 2025 року (01.04.2025–14.04.2025). Аналіз базується на даних про випуск електроенергії та ціни на ринку на добу наперед (РДН) в Об'єднаній енергетичній системі України. Метою

є оцінка фінансової ефективності накопичувачів за цей період і визначення динаміки прибутку, що дозволить зробити висновки щодо їх практичної цінності для підвищення енергоефективності розподільної мережі 110 кВ.

Таблиця 3.4 – Дані щодо випуску електроенергії (МВт·год) з 01.04.2025 по 14.04.2025

| t  | Wp1   | Wp2   | Wp3   | Wp4   | Wp5   | Wp6   | Wp7   | Wp8   | Wp9   | Wp10  | Wp11  | Wp12  | Wp13  | Wp14  |
|----|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 1  | 242.6 | 243.5 | 234.7 | 250.8 | 255.3 | 251.9 | 252.4 | 220.2 | 224.4 | 224.4 | 235.6 | 226.3 | 215.9 | 227.0 |
| 2  | 220.1 | 219.4 | 223.4 | 219.3 | 237.4 | 238.9 | 234.0 | 193.5 | 201.8 | 209.8 | 213.2 | 205.5 | 217.7 | 209.9 |
| 3  | 201.0 | 219.9 | 216.6 | 225.8 | 225.4 | 227.4 | 219.5 | 191.8 | 197.7 | 200.0 | 201.7 | 200.6 | 201.8 | 210.3 |
| 4  | 209.5 | 208.9 | 203.7 | 219.6 | 218.1 | 216.0 | 220.7 | 192.1 | 191.5 | 204.9 | 183.6 | 200.1 | 201.9 | 206.5 |
| 5  | 216.4 | 205.5 | 215.9 | 212.1 | 234.5 | 226.5 | 210.2 | 200.2 | 198.3 | 215.7 | 196.6 | 192.8 | 215.7 | 195.4 |
| 6  | 268.7 | 236.2 | 244.1 | 250.2 | 252.2 | 234.0 | 224.9 | 228.3 | 233.8 | 243.7 | 216.5 | 235.9 | 218.1 | 216.5 |
| 7  | 323.7 | 315.2 | 305.7 | 329.3 | 342.2 | 293.7 | 248.0 | 314.2 | 304.5 | 308.1 | 275.8 | 301.8 | 273.0 | 245.6 |
| 8  | 346.3 | 319.4 | 331.1 | 353.6 | 333.6 | 289.2 | 252.3 | 319.8 | 328.8 | 329.7 | 308.6 | 320.2 | 275.0 | 256.4 |
| 9  | 361.2 | 326.1 | 317.1 | 355.8 | 335.3 | 318.0 | 238.2 | 316.5 | 318.8 | 329.2 | 289.7 | 297.3 | 288.0 | 254.3 |
| 10 | 356.7 | 289.6 | 321.6 | 333.2 | 309.5 | 337.6 | 265.9 | 313.2 | 301.9 | 286.5 | 285.4 | 283.1 | 301.6 | 234.1 |
| 11 | 323.8 | 270.0 | 288.7 | 342.4 | 289.7 | 297.8 | 252.5 | 266.9 | 263.9 | 309.1 | 265.0 | 230.2 | 291.6 | 255.5 |
| 12 | 262.0 | 245.9 | 263.4 | 313.4 | 271.8 | 300.0 | 250.4 | 205.7 | 242.4 | 252.4 | 254.1 | 225.9 | 277.1 | 234.0 |
| 13 | 287.4 | 236.1 | 275.0 | 329.1 | 264.7 | 337.6 | 250.8 | 224.3 | 236.2 | 251.0 | 267.4 | 231.6 | 259.7 | 220.3 |
| 14 | 285.4 | 253.3 | 273.1 | 333.0 | 342.2 | 320.3 | 287.8 | 234.6 | 236.3 | 248.6 | 275.2 | 225.9 | 262.3 | 234.1 |
| 15 | 312.1 | 301.5 | 296.3 | 341.2 | 339.0 | 314.6 | 266.1 | 254.8 | 245.3 | 289.6 | 299.5 | 233.3 | 277.0 | 254.8 |
| 16 | 288.0 | 286.2 | 280.7 | 319.6 | 331.3 | 306.2 | 294.1 | 267.4 | 264.3 | 278.8 | 315.4 | 273.6 | 310.1 | 273.9 |
| 17 | 307.6 | 291.1 | 285.1 | 329.7 | 307.2 | 319.5 | 290.3 | 283.7 | 265.9 | 277.9 | 287.9 | 277.9 | 323.5 | 285.9 |
| 18 | 315.0 | 317.5 | 330.5 | 340.1 | 314.1 | 346.0 | 283.7 | 313.0 | 296.9 | 310.3 | 322.3 | 301.3 | 307.8 | 287.3 |
| 19 | 343.3 | 344.7 | 343.0 | 354.1 | 347.3 | 366.9 | 304.0 | 338.3 | 345.8 | 337.4 | 352.0 | 325.7 | 331.1 | 298.8 |
| 20 | 377.6 | 362.9 | 369.1 | 356.7 | 362.1 | 384.3 | 324.3 | 359.4 | 359.6 | 342.7 | 368.5 | 344.0 | 336.0 | 328.4 |
| 21 | 388.9 | 386.5 | 403.5 | 395.0 | 387.7 | 390.2 | 376.1 | 398.6 | 389.7 | 400.6 | 397.6 | 367.6 | 369.3 | 362.6 |
| 22 | 355.6 | 340.9 | 356.3 | 374.8 | 351.8 | 364.9 | 332.4 | 358.6 | 349.4 | 344.5 | 348.9 | 329.4 | 356.4 | 323.0 |
| 23 | 318.1 | 314.2 | 308.3 | 314.7 | 309.2 | 321.0 | 287.8 | 295.5 | 293.6 | 289.3 | 308.8 | 293.6 | 291.6 | 272.2 |
| 24 | 277.7 | 264.9 | 264.4 | 291.7 | 283.1 | 281.3 | 239.2 | 242.9 | 257.5 | 255.5 | 250.6 | 256.8 | 263.8 | 226.4 |

Таблиця 3.4 – Дані щодо ціни (грн) на електроенергію з 01.04.2025 по 14.04.2025 на РДН ОЕС України

| BW1   | BW2   | BW3   | BW4   | BW5   | BW6   | BW7   | BW8   | BW9   | BW10  | BW11  | BW12  | BW13  | BW14  |
|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 2 871 | 3 725 | 4 376 | 4 445 | 5 596 | 4 438 | 4 197 | 4 359 | 4 376 | 4 563 | 4 197 | 4 597 | 4 945 | 4 100 |
| 2 014 | 1 997 | 3 669 | 4 185 | 4 189 | 3 777 | 2 939 | 3 724 | 3 336 | 3 991 | 4 000 | 4 000 | 4 197 | 3 494 |
| 1 425 | 748   | 3 187 | 3 708 | 3 841 | 2 998 | 1 000 | 2 822 | 2 952 | 3 496 | 3 600 | 3 680 | 3 665 | 2 965 |
| 970   | 459   | 3 067 | 3 165 | 2 989 | 2 440 | 181   | 2 781 | 2 784 | 2 963 | 3 340 | 3 400 | 3 494 | 2 189 |
| 1 133 | 610   | 3 120 | 3 491 | 2 988 | 2 642 | 179   | 2 781 | 2 902 | 2 976 | 3 340 | 3 400 | 3 494 | 2 965 |
| 2 073 | 1 990 | 3 826 | 3 909 | 3 766 | 3 293 | 2 981 | 3 738 | 3 675 | 3 989 | 3 600 | 3 494 | 3 400 | 3 494 |
| 3 479 | 4 180 | 4 440 | 4 449 | 3 847 | 2 867 | 4 445 | 4 285 | 4 370 | 4 491 | 4 197 | 3 494 | 3 400 | 4 642 |
| 6 271 | 5 398 | 6 869 | 6 790 | 3 997 | 3 068 | 6 621 | 6 633 | 6 735 | 5 910 | 6 776 | 3 400 | 3 325 | 6 400 |
| 6 404 | 6 270 | 6 899 | 6 863 | 5 703 | 3 411 | 6 895 | 6 159 | 6 731 | 6 750 | 6 900 | 3 400 | 3 000 | 6 276 |
| 6 207 | 5 658 | 6 899 | 5 593 | 4 693 | 2 966 | 6 601 | 5 938 | 6 144 | 5 914 | 6 274 | 3 290 | 2 692 | 4 100 |
| 4 648 | 3 800 | 6 887 | 3 246 | 4 139 | 1 590 | 4 105 | 5 419 | 4 471 | 4 820 | 4 597 | 2 690 | 1 989 | 3 440 |
| 3 030 | 2 968 | 4 665 | 1 529 | 3 607 | 868   | 2 984 | 3 606 | 2 946 | 3 834 | 3 340 | 430   | 100   | 555   |
| 3 011 | 2 674 | 3 749 | 834   | 1 973 | 698   | 704   | 2 586 | 1 543 | 2 951 | 2 390 | 468   | 100   | 450   |
| 2 897 | 2 668 | 3 000 | 904   | 1 986 | 695   | 1 834 | 2 803 | 1 405 | 1 553 | 1 794 | 450   | 100   | 450   |
| 2 871 | 2 448 | 2 877 | 924   | 1 706 | 416   | 2 350 | 2 805 | 1 435 | 1 469 | 1 794 | 430   | 100   | 989   |
| 3 314 | 2 741 | 2 931 | 2 847 | 2 425 | 744   | 3 161 | 3 113 | 1 973 | 1 864 | 2 700 | 430   | 100   | 989   |
| 3 412 | 3 485 | 3 754 | 4 798 | 3 236 | 2 025 | 3 483 | 3 700 | 2 968 | 2 829 | 2 950 | 999   | 2 050 | 2 650 |
| 4 470 | 4 324 | 4 035 | 6 061 | 3 615 | 3 322 | 4 366 | 4 143 | 3 958 | 3 588 | 4 197 | 3 444 | 4 115 | 4 597 |
| 6 773 | 6 722 | 6 680 | 8 787 | 5 942 | 5 991 | 6 482 | 6 527 | 5 360 | 5 146 | 5 500 | 4 500 | 4 980 | 6 269 |
| 8 234 | 8 238 | 8 163 | 8 733 | 7 490 | 7 561 | 8 575 | 8 796 | 8 102 | 7 775 | 8 000 | 8 000 | 8 300 | 8 700 |
| 8 642 | 8 571 | 8 854 | 9 000 | 8 295 | 8 363 | 8 999 | 8 961 | 8 869 | 8 633 | 8 870 | 8 677 | 8 300 | 8 892 |
| 8 150 | 7 380 | 8 851 | 9 000 | 6 796 | 8 254 | 8 945 | 8 855 | 8 873 | 8 494 | 8 870 | 8 200 | 8 300 | 8 890 |
| 6 869 | 5 590 | 6 952 | 8 840 | 5 053 | 6 095 | 7 479 | 8 335 | 6 835 | 6 684 | 7 400 | 6 800 | 6 751 | 7 950 |
| 5 570 | 4 404 | 5 612 | 6 415 | 4 146 | 5 594 | 5 639 | 5 911 | 4 442 | 4 798 | 5 860 | 5 860 | 6 400 | 5 683 |

Представлені таблиці 3.4 (частина 1 і частина 2), які містять дані про прибуток і сумарний прибуток від впровадження накопичувачів потужністю 40 МВт протягом перших двох тижнів квітня 2025 року (01.04.2025–14.04.2025).

Таблиця 3.4 – Прибуток (тис.грн) протягом першого тижня (01.04.2025–07.04.2025)

| День     | 1      | 2      | 3   | 4     | 5     | 6     | 7     |
|----------|--------|--------|-----|-------|-------|-------|-------|
| Прибуток | 255.6  | 270.0  | 225 | 271   | 209   | 209   | 336   |
| Сум дох  | 255.56 | 525.57 | 751 | 1 022 | 1 231 | 1 440 | 1 776 |

Таблиця 3.5 – Прибуток (тис.грн) протягом другого тижня (08.04.2025–14.04.2025)

| День     | 8     | 9     | 10    | 11    | 12    | 13    | 14    |
|----------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Прибуток | 233   | 209   | 250   | 245   | 192   | 190   | 285   |
| Сум дох  | 2 008 | 2 218 | 2 467 | 2 712 | 2 904 | 3 094 | 3 379 |

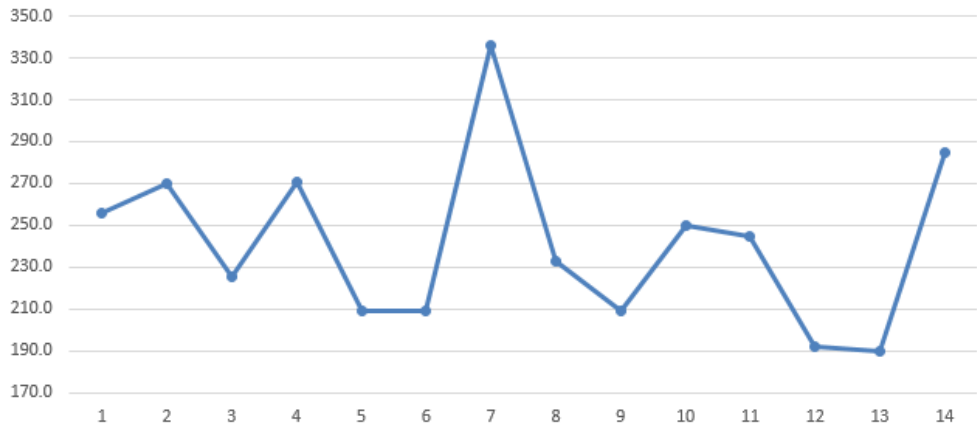


Рисунок 3.6 – Графік прибутку ЕНЕ з 01.04.2025 по 14.04.2025

Аналіз прибутку від використання електрохімічних накопичувачів енергії (ЕНЕ) потужністю 40 МВт у розподільчих мережах АТ «Вінницяобленерго» за період із 01.04.2025 по 14.04.2025 підтвердив їх економічну ефективність. Згідно з таблицями 3.4 та 3.5, сумарний прибуток за 14 днів склав 3379 тис. грн, а середній денний прибуток становив 241.36 тис. грн. Найвищий прибуток зафіксовано 7-го квітня (336 тис. грн), що пояснюється високими піковими цінами на ринку на добу наперед, тоді як найнижчий показник (190 тис. грн) спостерігався 13-го квітня через зниження цін на електроенергію.

Графік на рисунку 3.6 ілюструє нерівномірну динаміку прибутку, що відображає залежність прибутку від коливань цін на РДН. Незважаючи на ці коливання, стабільне зростання сумарного прибутку (з 255.56 тис. грн 1-го квітня до 3379 тис. грн 14-го квітня) свідчить про практичну цінність ЕНЕ для оптимізації витрат на електроенергію. Отримані результати доповнюють економічну оцінку, проведену в підрозділі 3.1, і підтверджують, що використання ЕНЕ сприяє підвищенню енергоефективності розподільної мережі 110 кВ шляхом ефективного балансування навантаження та забезпечення додаткового прибутку.

## 4 ОХОРОНА ПРАЦІ

У цьому розділі бакалаврської кваліфікаційної роботи розробляються заходи з охорони праці в процесі обслуговування електричної частини підстанції з електрохімічним накопичувачем електричної енергії. Отже, на оперативно-ремонтний персонал, що здійснює експлуатацію обладнання підстанції, впливають такі шкідливі виробничі фактори [17, 18]: 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

#### 4.1.1 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 4.2) "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 ізольований 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 виникла 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 вводів 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 повітрязбірники, електролізні установки, акумуляторні батареї та зарядні пристрої, повинні мати групу III.

#### 4.1.2 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;

- огорожити, 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, показчики напруги, пристрої для створення безпечних умов праці під час проведення випробувань і вимірювань в електроустановках (показчики напруги для фазування, показчики 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 [19], 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

### 4.2.1 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°C        | 0,2-0,5        |
| Холодний    | Пб              | 13-23           | не більш 75        | не більш 0,4   |

### 4.2.2 Склад повітря робочої зони

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

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

| Назва речовини      | ГДК, мг/м <sup>3</sup> |                 | 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 перешкодження попадання пилу в приміщення під час роботи лінії;
- встановлення пиловловлюючих засобів.

#### 4.2.3 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 з 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.

#### 4.2.4 Виробничий шум

Для відносної логарифмічної шкали в якості нульових рівнів обрані показники, що характеризують мінімальний поріг сприйняття звуку людським вухом на частоті 1000 Гц. Нормативним документом, який регламентує рівні шуму для різних категорій робочих місць службових приміщень, є «ССБТ. Шум. Загальні вимоги безпеки» (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 вибухонебезпекою та пожежонебезпекою 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 II-III (місця, де зберігаються тверді горючі речовини). Будівля, в якій розташовані ці приміщення, характеризується III ступенем вогнестійкості.

До III ступеня вогнестійкості відносяться будинки з несучими та огорожувальними конструкціями з природних або штучних кам'яних матеріалів, бетону, залізобетону. Для перекриттів дозволяється застосовувати дерев'яні конструкції, захищені штукатуркою або негорючими листовими, плитними матеріалами, або матеріалами груп горючості Г1 (низької горючості), Г2 (помірної горючості). До елементів покриттів не висуваються вимоги щодо межі вогнестійкості, поширення вогню, при цьому елементи горищного покриття з деревини повинні мати вогнезахисну обробку. Мінімальні межі вогнестійкості будівельних конструкцій (у хвиликах) та максимальні межі поширення вогню по них (см) за ДБН В.1.1.7-2016 наведено в таблиці 4.5.

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

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

Протипожежні перешкоди і мінімальні межі їх вогнестійкості за ДБН В.1.1.7-2002 наведено в таблиці 4.6.

Таблиця 4.6 – Протипожежні перешкоди та мінімальні межі їх вогнестійкості

| Протипожежні перешкоди | Типи протипожежних перешкод або їх елементів | Мінімальна межа вогнестійкості протипожежної перешкоди (у хвилинах) | Тип заповнення прорізів, не нижче | Тип протипожежного 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 4.7 (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/м<sup>2</sup> наступна: до 1 – 100 м<sup>2</sup>.

На території підстанції встановлено 12 вогнегасників ВП-5.

## ВИСНОВКИ

У ході виконання бакалаврської кваліфікаційної роботи було проведено всебічне дослідження впливу електрохімічних накопичувачів енергії (ЕНЕ) на показники енергоефективності розподільної електричної мережі класу напруги 110 кВ. Основні результати дослідження можна підсумувати наступним чином:

1. Проаналізовано технічний стан та перспективи впровадження електрохімічних накопичувачів енергії в умовах зростання частки відновлюваних джерел енергії. Встановлено, що застосування ЕНЕ (Battery Energy Storage Systems) значно підвищує гнучкість, стійкість та ефективність роботи мережі, дозволяє компенсувати нерівномірність генерації та згладжувати пікові навантаження.

2. Узагальнено класифікацію та властивості сучасних типів електрохімічних накопичувачів, визначено їх придатність для використання у мережах напругою 110 кВ. Окрему увагу приділено літій-іонним та натрій-сірчаним технологіям, які демонструють найкраще співвідношення між вартістю, енергоємністю та ресурсом.

3. У третьому розділі проведено детальну економічну оцінку доцільності впровадження ЕНЕ у розподільну мережу АТ «Вінницяобленерго». На підставі моделювання та розрахунків визначено, що встановлення накопичувача потужністю 40 МВт забезпечує значну економічну вигоду за рахунок:

- зменшення витрат на оплату потужності;
- оптимізації графіків споживання електроенергії в умовах внутрішньодобового ринку.

Розрахунки показали, що термін окупності проекту при відповідному тарифному регулюванні може становити приблизно 5 років, що робить впровадження ЕНЕ економічно обґрунтованим рішенням.

4. У розділі з охорони праці забезпечення безпеки під час експлуатації електричної частини підстанції з електрохімічним накопичувачем енергії. У

ньому детально описано шкідливі виробничі фактори, зокрема фізичні (мікроклімат, шум, вібрація, освітлення), хімічні (пил, газы) та фактори трудового процесу (важкість і напруженість праці). Запропоновано технічні рішення для безпечної організації робочих місць, включаючи виконання робіт за нарядами, використання електрозахисних засобів, заземлення та огороження струмопровідних частин. Особлива увага приділена електробезпеці, зокрема підготовці робочого місця та застосуванню ізолювальних засобів. Розглянуто заходи з гігієни праці, такі як нормування мікроклімату, контроль забруднення повітря, забезпечення належного освітлення та зниження шуму. Пожежна безпека забезпечується класифікацією приміщень за категорією Д, використанням вогнестійких матеріалів і встановленням вогнегасників. Висновки підкріплені посиланнями на нормативні документи. Загалом, розділ ґрунтовно охоплює аспекти безпеки, пропонуючи комплексний підхід до мінімізації ризиків для персоналу, що сприяє ефективній і безпечній експлуатації підстанції.

Таким чином, результати роботи підтверджують доцільність інтеграції електрохімічних накопичувачів у структуру сучасних розподільних мереж. Комплексний підхід до техніко-економічного обґрунтування впровадження ЕНЕ дозволяє не лише підвищити надійність електропостачання, а й забезпечити значний економічний ефект для операторів систем розподілу.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Правила улаштування електроустановок. – Видання офіційне. Міненерговугілля України. – Х. : Видавництво «Форт», 2017. – 760 с.
2. M. Stecca, L. R. Elizondo, T. B. Soeiro, P. Bauer and P. Palensky, "A Comprehensive Review of the Integration of Battery Energy Storage Systems Into Distribution Networks," in IEEE Open Journal of the Industrial Electronics Society, vol. 1, pp. 46-65, 2020, doi: 10.1109/OJIES.2020.2981832.
3. Володимир Кулик, Олег Кісельов, «Електрохімічні накопичувачі енергії для підвищення енергоефективності розподільних мереж операторів систем розподілу,» в матеріалах Міжнародної науково-практичної інтернет-конференції "Молодь в науці: дослідження, проблеми, перспективи (МН-2025)", м. Вінниця, 15-16 червня 2025 р. –Режим доступу: <https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/mn/mn2025/paper/view/23500>
4. 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>.
5. K. Clement, E. Haesen, and J. Driesen, "Stochastic analysis of the impact of plug-in hybrid electric vehicles on the distribution grid," in Proc. CIRED 20th Int. Conf. Exhib. Electric. Distribution - Part 2, 2009, pp. 1–4. – <https://ieeexplore.ieee.org/document/5371206>.
6. . Стогній Б.С., Кириленко О.В., Денисюк С.П. Інтелектуальні електричні мережі електроенергетичних систем та їх технологічне забезпечення // Технічна електродинаміка. – 2015. – №6. – С. 44–50. – <http://dspace.nbu.gov.ua/handle/123456789/61922>.
7. ГКД 341.004.001 – 94 Норми технологічного проектування підстанційзмінного струму з вищою напругою 6 – 750 кВ;
8. R. Moreira, G. Strbac, P. Papadopoulos and A. Laguna, "Business case in support for reactive power services from distributed energy storage," CIRED-Open Access Proceedings Journal, vol. 2017, no. 1, pp. 1609-1613, Oct. 2017. –

<https://www.researchgate.net/publication/321205552>.

9. M. Stecca, L. R. Elizondo, T. B. Soeiro, P. Bauer and P. Palensky, "A Comprehensive Review of the Integration of Battery Energy Storage Systems Into Distribution Networks," in IEEE Open Journal of the Industrial Electronics Society, vol. 1, pp. 46-65, 2020, doi: 10.1109/OJIES.2020.2981832. – <https://ieeexplore.ieee.org/document/9040552>.

10. ДСТУ EN 50160:2014 Характеристики напруги електропостачання в електричних мережах загальної призначеності (EN 50160:2010, IDT). Київ, Мінекономрозвитку України, 2014. 27 с.

11. Звіт з оцінки відповідності (достатності) генеруючих потужностей. НЕК «Укренерго». URL: [https://ua.energy/wp-content/uploads/2020/03/Zvit-z-otsinky-vidpovidnostidostatnostigeneruyuchyhpotuzhnostej2019.pdf?fbclid=IwAR2dQAbmI14EsQ1pkcvQKXPBaUbcSgozEmp5WPwCKtgz\\_xyvXuqQZLJ2wM](https://ua.energy/wp-content/uploads/2020/03/Zvit-z-otsinky-vidpovidnostidostatnostigeneruyuchyhpotuzhnostej2019.pdf?fbclid=IwAR2dQAbmI14EsQ1pkcvQKXPBaUbcSgozEmp5WPwCKtgz_xyvXuqQZLJ2wM).

12. Інтеграція ВДЕ в енергосистему України. Укренерго. URL: <https://ua.energy/zagalni-novyny/u-2020-rotsi-vstanovlena-potuzhnist-ves-ta-ses-zrosla-na-41-ayihnya-chastka-u-strukturi-vyrobnytstvaeelektroenergiyi-vdvichi/>.

13. Національний план дій з розвитку відновлюваної енергетики на період до 2030 року. Проект. URL: <https://saee.gov.ua/uk/content/elektronni-consultatsii>.

14. Electricity Storage and Renewables: Costs and Markets to 2030. IRENA, 2017.

15. G. Zubi, R. Dufo-López, M. Carvalho, and G. Pasaoglu, "The lithiumion battery: State of the art and future perspectives," Renewable Sustain. Energy Rev., vol. 89, pp. 292–308, Jun. 2018. – <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032118300728>.

16. ДТЕК запустив першу в Україні промислову систему накопичення енергії. URL: <https://dtek.com/media-center/news/dtek-zapustil-pervuyu-v-ukraine-promyshlennuyusistemu-nakopleniya-energii/>

17. Handbook on battery energy storage system. ADB, 2018. 92 p. <http://dx.doi.org/10.22617/TCS189791-2>

18. Літій – іонний акумулятор – 2022. – Режим доступу: [https://en.wikipedia.org/wiki/Lithiumion\\_battery](https://en.wikipedia.org/wiki/Lithiumion_battery).

19. Системи накопичення енергії: чи є майбутнє в Україні? – 2022. -Режим доступу: <https://ecopolitic.com.ua/ua/news/sistemi-nakopichennya-energii-chi-ie-majbutnie-vukraini/>

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

18. 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->.

19. ДНАОП 1.1.10-1.01-97 Правила безпечної експлуатації електроустановок. URL: [https://online.budstandart.com.ua/catalog/doc-page?id\\_doc=21826](https://online.budstandart.com.ua/catalog/doc-page?id_doc=21826).

20. 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.

21. 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>.

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

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

24. ДБН В.2.5-28:2018 Природне і штучне освітлення. URL: [http://online.budstandart.com.ua/catalog/doc-page.html?id\\_doc=79885](http://online.budstandart.com.ua/catalog/doc-page.html?id_doc=79885)

25. 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>.

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

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

28. ДСТУ 8828:2019 Пожежна безпека. Загальні положення.

29. 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>.

30. 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](https://dbn.co.ua/load/normativy/dstu/dstu_b_v_1_1_36/5-1-0-1759).

31. 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](http://www.poliplast.ua/doc/dbn_v.1.1-7-2002.pdf).

## ДОДАТКИ

## ДОДАТОК А

### ПРОТОКОЛ ПЕРЕВІРКИ НАВЧАЛЬНОЇ (КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ) РОБОТИ

Назва роботи: «Вплив електрохімічних накопичувачів енергії на енергоефективність розподільної мережі 110 кВ»

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

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

Керівник: д.т.н., доцент., проф. каф. ЕСС Кулик В. В.  
(прізвище, ініціали, посада)

#### Показники звіту подібності

| StrikePlagiarism  |      |
|-------------------|------|
| Оригінальність    | 95.6 |
| Загальна схожість | 4.4  |

#### Аналіз звіту подібності (відмітити потрібне)

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

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

Автор

(підпис)

Кісельов О.М.

(прізвище, ініціали)

#### Опис прийнятого рішення

Робота допущена до захисту

Особа, відповідальна за перевірку

(підпис)

Вишневський С.Я.

(прізвище, ініціали)

ДОДАТОК В  
ІЛЮСТРАТИВНА ЧАСТИНА

«Вплив електрохімічних накопичувачів енергії на енергоефективність  
розподільної мережі 110 кВ»



ВІННИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
ФАКУЛЬТЕТ ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИКИ ТА ЕЛЕКТРОМЕХАНІКИ  
КАФЕДРА ЕЛЕКТРИЧНИХ СТАНЦІЙ І СИСТЕМ

1

Бакалаврська кваліфікаційна робота на тему:  
Вплив електрохімічних накопичувачів енергії на  
енергоефективність розподільної мережі 110 кВ

Керівник роботи: д.т.н., проф. каф. ЕСС

Кулик В. В.

Виконав: студент групи ЕСМ-23мс

Кісельов О. М.

## ВСТУП

2

**Актуальність теми:** Сучасні розподільні мережі, зокрема мережі класу напруги 110 кВ, спочатку проектувалися під централізоване електропостачання від великих генерувальних потужностей. Проте стрімкий розвиток відновлюваних джерел енергії (ВДЕ) — сонячної та вітрової генерації — та поширення нових типів навантажень, таких як електротранспорт, вимагають глибокої трансформації принципів функціонування енергосистем. Ці зміни супроводжуються нестабільністю генерації та потребують нових технічних рішень для забезпечення надійної та ефективної роботи мереж. Одним із найбільш перспективних рішень є впровадження електрохімічних накопичувачів енергії (ЕНЕ), які здатні забезпечити гнучкість, оптимізувати розподіл потужності та покращити енергоефективність.

**Метою дипломної роботи** є підвищення енергоефективності та надійності функціонування розподільної електромережі 110 кВ шляхом обґрунтованої інтеграції електрохімічних накопичувачів енергії.

ВДЕ-генерація та активні споживачі, як правило, мають вкрай нерівномірний графік видачі та споживання електроенергії. Керування такими специфічними, тим паче масовими об'єктами ВДЕ-генерації є досить складне завдання.

Із розвитком електроенергетичних систем (ЕЕС) та збільшенням потужностей агрегатів, що виробляють енергію, проблема накопичення й збереження енергії стає все більш актуальною. Усунути цей недолік можливо через створення ЕНЕ – реверсивних пристроїв для часткового чи повного розділення у часі генерації та споживання енергії. У ЕНЕ здійснюється накопичення енергії, отриманої з ЕЕС, її зберігання та видача за потреби назад в енергосистему.

За наявності достатньої кількості тих чи інших ЕНЕ їх можна застосовувати для забезпечення певної частки пікового чи максимального навантаження в ЕЕС. Це забезпечує суттєвий економічний результат, який залежить від виду енергоакumuлюючих пристроїв – накопичувачів та їхніх параметрів. Важливу роль для досягнення економічного ефекту й покращення керованості ЕЕС відіграє також оптимальне розташування таких пристроїв.

За інформацією USAID, на рисунках нижче зображено графіки приросту щорічних встановлених потужностей вітрових електростанцій (ВЕС) і сонячних електростанцій (СЕС) із фотоелектричними панелями, починаючи з 2001 року.

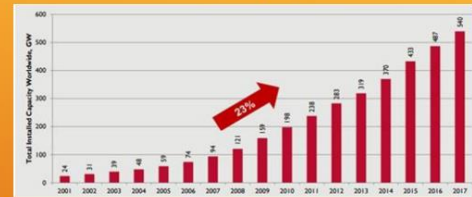


Рисунок 1

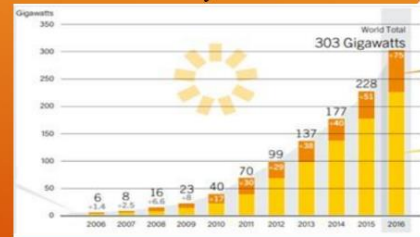


Рисунок 2

Наявність накопичувачів поряд з іншими інноваціями в енергосистемі допомагає знижувати нестабільність вироблення вітрової та сонячної енергії (рис. 3), що підвищує надійність ВДЕ, необхідну для конкуренції з традиційними джерелами. При цьому накопичувачі не тільки здатні поліпшити процес інтеграції самих ВДЕ, але також впливають на режим роботи енергосистеми, здатні швидко усунути аварійну ситуацію, що виникає в енергосистемі.

Функції, що забезпечуються системою накопичення енергії:

- ✓ Режим джерела безперебійного живлення.
- ✓ Зрізання піків потужності.
- ✓ Компенсація різко змінного навантаження.
- ✓ Регулювання напруги і частоти.
- ✓ Обмеження наростання і скидання навантаження (критично для газових генераторів).
- ✓ Стабілізація роботи генераторного обладнання.
- ✓ Заміна «обертowego резерву».

НЕ – це пристрій, який здатен накопичувати, зберігати та, за потреби, видавати енергію для цільового використання. Вони різняться за обсягом збереженої енергії, швидкістю її накопичення й віддачі, питомою енергоємністю, тривалістю зберігання та іншими характеристиками.

НЕ діляться на три основні групи [15, 16]:

- накопичувачі електроенергії (НЕЕ);
- накопичувачі теплової енергії (НТЕ);
- накопичувачі механічної енергії (НМЕ).

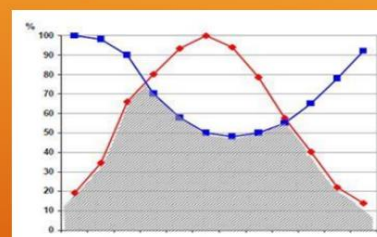


Рисунок 3

Найперспективнішою з технічної та економічної точки зору вважається технологія літій-іонних батарей. Вони демонструють високу енергетичну щільність (90–190 Вт·год/кг), ККД понад 95% та тривалий термін експлуатації (до 10 000 циклів) залежно від хімічного складу (наприклад, NMC, LFP). Завдяки зменшенню собівартості виробництва (рис. 3), літій-іонні накопичувачі займають провідні позиції на ринку як для побутових, так і для промислових застосувань.

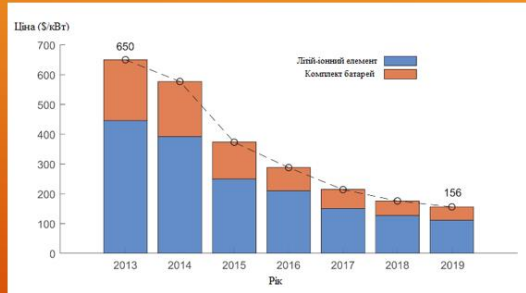


Рисунок 4

### Вплив ЕНЕ на втрати в мережі

Однією з найважливіших технічних переваг впровадження електрохімічних накопичувачів енергії (ЕНЕ) у розподільні мережі є зменшення втрат електроенергії. Втрати активної потужності виникають у кожному елементі електричної мережі — трансформаторах, повітряних та кабельних лініях, комутаційних пристроях — і прямо залежать від величини струму, який протікає мережею. У класичній топології розподільних мереж, де потік електроенергії є переважно односпрямованим — від вузла генерації до споживача — втрати мають усталений характер і зростають при збільшенні навантаження. Проте з впровадженням децентралізованої генерації, зокрема з використанням відновлюваних джерел енергії, характер енергетичних потоків у мережі змінився. Це спричинило потребу у використанні нових технічних засобів для стабілізації режимів і зменшення втрат.

Представлено типові системні послуги, які можуть забезпечувати накопичувачі енергії в розподільних мережах. Вони класифіковані за шкалою часу реагування та характером навантаження.

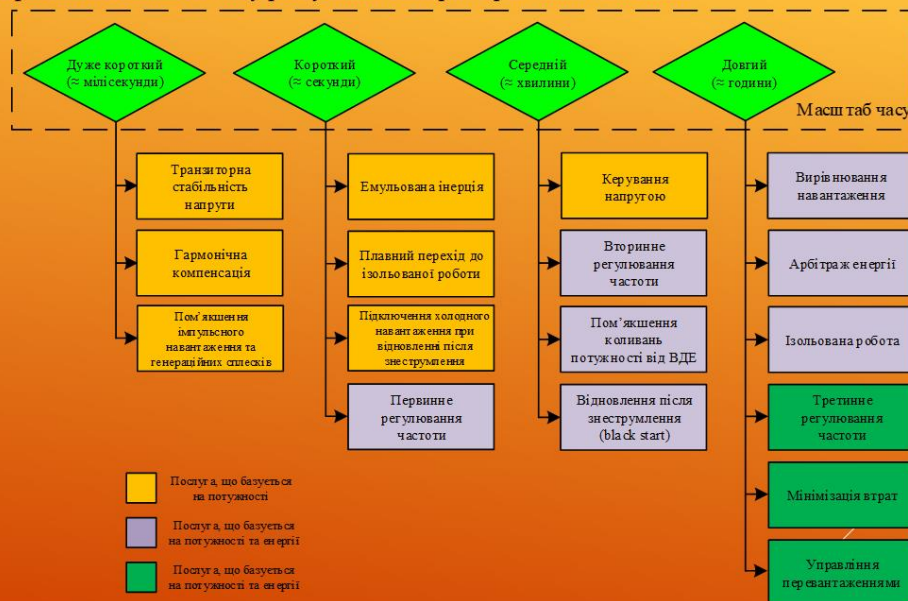




Рисунок 5 – Графік відпуску електричної енергії 20.04.2025

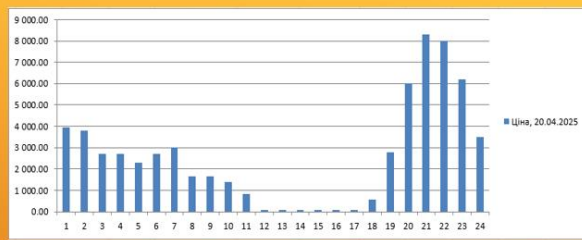


Рисунок 6 – Ціна відпуску електричної енергії 20.04.2025

В періоди найменших та найрівномірніших навантажень накопичувачу переходить в режим заряду і накопичує енергію. В час ранкового та вечірнього піку BESS розряджається і «віддає» електричну енергію в мережу. Варто зауважити, що BESS може працювати деякий час і в режимі резервного джерела, наприклад, у випадку припинення живлення від основного джерела електроенергії.

В періоди найменших та найрівномірніших навантажень накопичувачу переходить в режим заряду і накопичує енергію. В час ранкового та вечірнього піку BESS розряджається і «віддає» електричну енергію в мережу. Варто зауважити, що BESS може працювати деякий час і в режимі резервного джерела, наприклад, у випадку припинення живлення від основного джерела електроенергії.

Порівняння прибутку в тис. грн/рік з встановленням додатковими ЕНЕ

| P (МВт)                 | 20.00   | 32.00   | 44.00   | 52.00   | 60.00    |
|-------------------------|---------|---------|---------|---------|----------|
| Прибуток (тис. грн/рік) | 37207.2 | 59027.5 | 80847.8 | 95394.6 | 109941.5 |
| T (років)               | 5.07    | 5.11    | 5.13    | 5.14    | 5.14     |

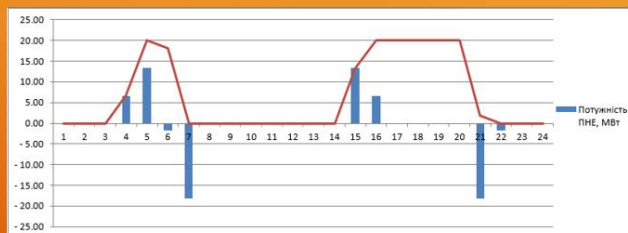


Рисунок 7 – Графік заряду-розряду ЕНЕ 20МВт протягом доби 20.04.2025

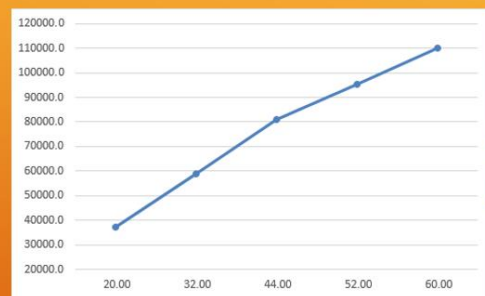


Рисунок 7 – Графік прибутку із додатковими ЕНЕ

Дані щодо випуску електроенергії  
(МВт·год) з 01.04.2025 по 14.04.2025

| t   | Wp1   | ... | Wp14  |
|-----|-------|-----|-------|
| 1   | 242.6 | ... | 227.0 |
| ... | ...   | ... | ...   |
| 24  | 277.7 | ... | 226.4 |

Дані щодо ціни (грн) на електроенергію  
з 01.04.2025 по 14.04.2025 на РДН ОЕС  
України

| BW1   | ... | BW14  |
|-------|-----|-------|
| 2 871 | ... | 4 100 |
| ...   | ... | ...   |
| 5 570 | ... | 5 683 |

Прибуток (тис.грн) протягом першого тижня  
(01.04.2025–07.04.2025)

| День     | 1      | 2      | 3   | 4     | 5     | 6     | 7     |
|----------|--------|--------|-----|-------|-------|-------|-------|
| Прибуток | 255.6  | 270.0  | 225 | 271   | 209   | 209   | 336   |
| Сум дох  | 255.56 | 525.57 | 751 | 1 022 | 1 231 | 1 440 | 1 776 |

Прибуток (тис.грн) протягом другого тижня  
(08.04.2025–14.04.2025)

| День     | 8     | 9     | 10    | 11    | 12    | 13    | 14    |
|----------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Прибуток | 233   | 209   | 250   | 245   | 192   | 190   | 285   |
| Сум дох  | 2 008 | 2 218 | 2 467 | 2 712 | 2 904 | 3 094 | 3 379 |

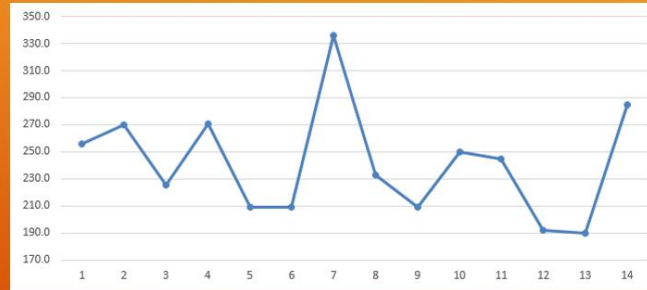


Рисунок 8 – Графік прибутку ЕНЕ з 01.04.2025 по  
14.04.2025

## Висновки

10

У ході виконання дипломної роботи було проведено всебічне дослідження впливу електрохімічних накопичувачів енергії (ЕНЕ) на показники енергоефективності розподільної електричної мережі класу напруги 110 кВ. Основні результати дослідження можна підсумувати наступним чином:

Проаналізовано технічний стан та перспективи впровадження електрохімічних накопичувачів енергії в умовах зростання частки відновлюваних джерел енергії. Встановлено, що застосування ЕНЕ (Battery Energy Storage Systems) значно підвищує гнучкість, стійкість та ефективність роботи мережі, дозволяє компенсувати нерівномірність генерації та згладжувати пікові навантаження.

Узагальнено класифікацію та властивості сучасних типів електрохімічних накопичувачів, визначено їх придатність для використання у мережах напругою 110 кВ. Особливу увагу приділено літій-іонним та натрій-сірчаним технологіям, які демонструють найкраще співвідношення між вартістю, енергоємністю та ресурсом.

У третьому розділі проведено детальну економічну оцінку доцільності впровадження ЕНЕ у розподільну мережу АТ «Вінницяобленерго». На підставі моделювання та розрахунків визначено, що встановлення накопичувача потужністю 40 МВт забезпечує значну економічну вигоду за рахунок:

- зменшення витрат на оплату потужності;
- оптимізації графіків споживання електроенергії в умовах внутрішньодобового ринку.

Розрахунки показали, що термін окупності проекту при відповідному тарифному регулюванні може становити приблизно 5 років, що робить впровадження ЕНЕ економічно обґрунтованим рішенням.

У розділі з охорони праці забезпечення безпеки під час експлуатації електричної частини підстанції з електрохімічним накопичувачем енергії. У ньому детально описано шкідливі виробничі фактори, зокрема фізичні (мікроклімат, шум, вібрація, освітлення), хімічні (пил, газ) та фактори трудового процесу (важкість і напруженість праці). Запропоновано технічні рішення для безпечної організації робочих місць, включаючи виконання робіт за нарядами, використання електрозахисних засобів, заземлення та огороження струмопровідних частин. Таким чином, результати роботи підтверджують доцільність інтеграції електрохімічних накопичувачів у структуру сучасних розподільних мереж. Комплексний підхід до техніко-економічного обґрунтування впровадження ЕНЕ дозволяє не лише підвищити надійність електропостачання, а й забезпечити значний економічний ефект для операторів систем розподілу.