

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
ПОЛІСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет інженерії та енергетики

Кафедра електрифікації, автоматизації виробництва та інженерної екології

Кваліфікаційна робота  
на правах рукопису

**Тинщук Дмитро Андрійович**

УДК 621.359.4

**КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА**

**Вплив акумулюючих систем зберігання електроенергії для підтримки  
стабільності мереж**  
(тема роботи)

141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

(шифр і назва спеціальності)

Подається на здобуття освітнього ступеня бакалавр

Кваліфікаційна робота містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

**Тинщук Д.А.**

(підпис, ініціали та прізвище здобувача вищої освіти)

Керівник роботи

**Савченко Л.Г**

(прізвище, ім'я, по батькові)

**к.і.н., доцент кафедри електрифікації,  
автоматизації виробництва та інженерної екології**  
(науковий ступінь, вчене звання)

Житомир – 2026

## АНОТАЦІЯ

**Тинщук Д.А.** Вплив акумулюючих систем зберігання електроенергії для підтримки стабільності мереж. Кваліфікаційна робота на здобуття освітнього ступеня магістр за спеціальністю 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка – Поліський національний університет, Житомир, 2026.

Акумулюючі системи зберігання електроенергії відіграють дедалі важливішу роль у забезпеченні стабільності електричних мереж, особливо в умовах зростання частки відновлюваних джерел енергії. Їхній вплив полягає у здатності швидко компенсувати дисбаланс між виробництвом і споживанням, зменшувати коливання частоти та напруги, а також підвищувати керованість енергосистеми в аварійних і пікових режимах. Для підтримки стабільності мереж пропонується комплексний підхід до впровадження накопичувачів.

**Ключові слова:** система зберігання електричної енергії; літій-іонні, свинцево-кислотні акумулятори; мікро мережа (MG); відновлювані джерела енергії.

## ABSTRACT

**Tinshchuk D.A.** The impact of energy storage systems for maintaining grid stability. Qualification work for obtaining a Master's degree in specialty 141 – Electrical Power Engineering, Electrical Engineering and Electromechanics – Polissia National University, Zhytomyr, 2026.

Energy storage systems play an increasingly important role in ensuring the stability of electrical grids, especially in the context of the growing share of renewable energy sources. Their impact lies in the ability to quickly compensate for imbalances between production and consumption, reduce frequency and voltage fluctuations, and increase the controllability of the power system in emergency and peak modes. For maintaining grid stability, a comprehensive approach to the implementation of energy storage is proposed.

**Keywords:** energy storage system; lithium-ion, lead-acid batteries; microgrid (MG); renewable energy sources.

## ЗМІСТ

|                                                                                                       |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| ВСТУП                                                                                                 | 4  |
| РОЗДІЛ 1 МЕРЕЖЕВІ МІКРО МЕРЕЖІ З ВДЕ ТА НАКОПИЧЕННЯМ ЕНЕРГІЇ: ПІДХОДИ ДО БАЛАНСУВАННЯ ТА СТАБІЛЬНОСТІ | 6  |
| 1.1. Значення мікро мережі з ВДЕ в сучасних енергосистемах                                            | 6  |
| 1.2 Експлуатація літій-іонних та свинцево-кислотних акумуляторів                                      | 9  |
| Висновок до першого розділу                                                                           | 12 |
| РОЗДІЛ 2 МОДЕЛЮВАННЯ ОБЛАДНАННЯ МІКРО МЕРЕЖІ                                                          | 14 |
| 2.1 Сонячні фотоелектричні батареї та виробництво електроенергії                                      | 15 |
| 2.2 Модель системи накопичення енергії                                                                | 17 |
| Висновки по другому розділу                                                                           | 19 |
| РОЗДІЛ 3. ОСНОВНА ЕНЕРГОСИСТЕМА (МЕРЕЖА)                                                              | 21 |
| 3.1. Силовий електронний інтерфейс (CEI)                                                              | 21 |
| 3.2 Ілюстрація двонаправлених AC/DC перетворювачів                                                    | 22 |
| 3.3 Система управління енергоспоживанням                                                              | 23 |
| Висновок до третього розділу                                                                          | 25 |
| РОЗДІЛ 4. АНАЛІЗ РЕЗУЛЬТАТІВ МОДЕЛЮВАННЯ                                                              | 26 |
| 4.1 Аналіз характеристик фотоелектричної (PV) системи та параметри акумуляторної батареї              | 26 |
| 4.2 Ефективність використання акумуляторів                                                            | 29 |
| 4.3 Термін служби акумуляторів                                                                        | 29 |
| 4.4 Економічна вигода                                                                                 | 30 |
| 4.5. Безпека                                                                                          | 30 |
| 4.6 Екологічність                                                                                     | 31 |
| Висновки до четвертого розділу                                                                        | 31 |
| ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ                                                                                     | 33 |
| СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ                                                                            | 35 |

## ВСТУП

В кваліфікаційній роботі проведено порівняльний аналіз літій-іонних (Li-ion) та свинцево-кислотних (LA) акумуляторів у межах допустимих значень рівня заряду (SoC), встановлених за допомогою системи керування акумуляторною батареєю (BMS), щоб спостерігати за їхньою поведінкою та визначити найбільш придатний акумулятор за таких обмежень. Дослідження показує, що акумулятор як пристрій зберігання енергії зробив значний внесок у енергосистеми, засновані на відновлюваній генерації. Тим не менш, з літератури стає очевидним, що в цих реалізаціях найчастіше використовувалися саме свинцево-кислотні акумулятори.

Отже, враховуючи їхні значні технічні параметри, важливо провести порівняльний аналіз літій-іонних накопичувачів енергії для застосування у ВДЕ. Основні напрямку аналізу визначаються наступним чином:

- проаналізувати поведінку запропонованої мікро мережі, підключеної до електромережі, з використанням моделювання змінного навантаження, інформації про ресурси та обладнання.
- проаналізувати вплив використання свинцево-кислотних (LA) та літій-іонних (Li-ion) акумуляторів як систем зберігання електричної енергії (EESS) для тієї ж мікро мережі, підключеної до електромережі.
- провести аналіз та визначити особливості роботи літій-іонних та свинцево-кислотних акумуляторів у запропонованій енергосистемі.

Інтеграція відновлюваних джерел енергії у мікро мережі потребує ефективних систем накопичення, здатних працювати за обмежень рівня заряду (SoC), які задаються системою керування батареєю (BMS). Попри поширеність свинцево-кислотних акумуляторів у практичних реалізаціях, літературні дані вказують на необхідність обґрунтованого вибору типу накопичувача з урахуванням технічних характеристик і поведінки в умовах реальної експлуатації мікро мережі. Тому порівняльний аналіз Li-ion та LA

акумуляторів у межах допустимих SoC є **актуальним** для підвищення надійності та ефективності енергосистем на базі ВДЕ.

**Мета роботи** — виконати порівняльний аналіз літій-іонних (Li-ion) і свинцево-кислотних (LA) акумуляторів у складі мікро мережі, підключеної до електромережі, за обмежень SoC, встановлених BMS, з метою оцінювання їхньої поведінки та визначення найбільш придатного типу акумулятора для таких умов.

**Об’єкт дослідження** це мікро мережа, підключена до електромережі, з відновлюваною генерацією та системою накопичення електричної енергії (EESS) в умовах змінного навантаження і доступності ресурсів.

**Предмет аналізу:** процеси заряджання/розряджання та експлуатаційні характеристики Li-ion і LA акумуляторів у складі EESS мікро мережі за обмежень рівня заряду (SoC), що задаються BMS, а також їхній вплив на показники роботи енергосистеми за результатами моделювання.

**Перелік публікацій автора за темою дослідження :**

1. Тинщук Д.А.

ЗНАЧЕННЯ МІКРОМЕРЕЖІ З ВДЕ В СУЧАСНИХ ЕНЕРГОСИСТЕМАХ.

Наукові читання – 2026: збірник тез доповідей науково-практичної конференції за підсумками I-го туру Всеукраїнського конкурсу студентських наукових робіт з галузей знань і спеціальностей. 20 квітня 2026 р. Житомир: Поліський національний університет, 2026. Ч.2. 119 с.

2. Тинщук Д.А., Левандовська В.В.

МОДЕЛЮВАННЯ ОБЛАДНАННЯ МІКРО МЕРЕЖІ

Наукові читання – 2026: збірник тез доповідей науково-практичної конференції за підсумками I-го туру Всеукраїнського конкурсу студентських наукових робіт з галузей знань і спеціальностей. 20 квітня 2026 р. Житомир: Поліський національний університет, 2026. Ч.2. 119 с.

## РОЗДІЛ 1

### МЕРЕЖЕВІ МІКРО МЕРЕЖІ З ВДЕ ТА НАКОПИЧЕННЯМ ЕНЕРГІЇ: ПІДХОДИ ДО БАЛАНСУВАННЯ ТА СТАБІЛЬНОСТІ

#### 1.1 Значення мікро мережі з ВДЕ в сучасних енергосистемах.

Глобальне щорічне зростання виробництва електроенергії перевищує загальне первинне постачання енергії (ЗППЕ). З 1980 року річний темп розвитку ЗППЕ становив 1,9%, що можна порівняти з постачанням електроенергії на рівні 4,9%. Це означає, що більша частина глобального розширення ЗППЕ відповідає за розвиток електроенергетики. Наразі світовий попит на електроенергію подвоюється кожні 14,5 років; свідчення вказують на постійне збільшення в перехідній перспективі. Слід зазначити, що понад 39% загального постачання електроенергії отримується з викопного палива (вугілля), а інші 23% – з природного газу [1]. Під час спалювання традиційного викопного палива, воно, як правило, викидає значну кількість CO<sub>2</sub>, зокрема, типового парникового газу (ПГ) і провідного чинника середнього загального підвищення температури та глобальної зміни клімату (ГЗК). Через несприятливі екологічні наслідки, спричинені ПГ, було впроваджено численні ініціативи [2].

Враховуючи тип традиційних електростанцій, вугільні електростанції викидають надмірну кількість CO<sub>2</sub> на одиницю поставленої електроенергії, 1,15 тони CO<sub>2</sub> на МВт год, тоді як газові електростанції викидають приблизно 0,75 тони на МВт год [3]. Викопне паливо стало причиною приблизно 40% із 38 мільярдів тон, вироблених кілька років тому. Для зменшення викидів парникових газів пріоритетним є пом'якшення викидів CO<sub>2</sub>, і функціональним підходом до обмеження цих викидів є заміна традиційних генераторів, починаючи з вугільних електростанцій, замінюючи їх невичерпними енергетичними системами, особливо сонячною та вітровою енергією, оскільки вони є надмірно доступними [4]. Зелена енергія в електроенергетичному секторі здатна задовольнити глобальний зростаючий попит на енергію, трансформуючи прогрес існуючої мережі в інтелектуальну мережу (Smart

Grid). Це мінімізує залежність від традиційного виробництва енергії через негативний вплив на екосистему.

Відновлювані джерела енергії (ВДЕ) є незамінними, оскільки вони є невичерпними за своєю природою, екологічно безпечними, масштабованими і можуть бути впроваджені в різних сферах застосування, таких як промисловість, комерція, сільське господарство та житлові райони[5]. ВДЕ, такі як вітрова та фотоелектрична (PV) енергія, значно розвинулися за останні кілька років, перевершивши інші системи відновлюваної енергетики. Вони можуть виробляти електроенергію у віддалених та недостатньо забезпечених енергією регіонах[6]. Інтеграція систем відновлюваної енергії, тобто фотоелектричних і вітрових, та акумуляторних систем зберігання енергії в енергомережу реалізується на різних рівнях. Отже, мікро мережі (MG) визнаються як засіб полегшення тягаря застарілих традиційних генераторів і мінімізації залежності від традиційних електрогенераторів [7].

Мікро мережа (MG) складається з розподілених генераторів (РГ) та кінцевих споживачів, розташованих в розподільчій системі. Крім того, мікро мережа з системою накопичення енергії (СНЕ) на рівні розподілу пом'якшує вплив відновлюваних джерел енергії (ВДЕ) на енергосистеми загального користування[8]. При належному управлінні вона може забезпечити широкий спектр переваг, таких як підвищення надійності та стійкості розподільчої системи[9]. Мікро мережа має три різні режими функціонування: мережевий, автономний та аварійний. У мережевому режимі мікро мережа підключена до основної мережі через точку спільного приєднання (ТСП). Мікро мережі, підключені до мережі, є енергосистемами загального користування з певним ступенем розподіленої генерації (РГ) та пов'язаних навантажень [10]. У цій роботі проводиться аналіз мікро мережі, підключеної до мережі. Як зазначалося вище, мікро мережі мають властиві їм змінні характеристики від систем відновлюваної енергії. Збільшення їхньої частки створило значні технічні проблеми у підтримці стабільності постачання та попиту електричної енергії в енергосистемі загального користування.

Різноманітні технології зберігання електричної енергії можуть бути використані для досягнення балансування змінної потужності в електромережі[11]. Це може стосуватися періодичних коливань, таких як дні, тижні або навіть місяці. У цьому випадку ефективність зберігання енергії відіграє важливу роль. Існує неминуча потреба в системах зберігання електричної енергії (ESS), які повинні зберігати енергію (заряд) у період низького попиту на енергію та розряджати (вивільняти) енергію в період пікового попиту для кінцевих споживачів[12]. Це одна з перших реалізацій, яка спонукає до включення зберігання енергії в сучасний ланцюг постачання електроенергії. Оскільки інтеграція відновлюваних джерел, тобто вітрової та сонячної енергії, в основну енергетичну мережу продовжує зростати, зберігання енергії необхідне для чергування та збільшення вихідної потужності відновлюваних джерел.

Відповідно, це пом'якшує різкі та сезонні зміни вихідної потужності, які виникають через мінливість енергопостачання від вищезазначених відновлюваних джерел[13]. Час зберігання та ефективність є одними з важливих характеристик цього типу технології накопичення електричної енергії. Роль СНЕЕ (систем накопичення електричної енергії) прогресувала в різноманітних провадженнях енергосистем, таких як підвищення стабільності енергосистеми, покращення ефективності електричної енергетичної системи, регулювання напруги, регулювання частоти та мінімізація екологічного сліду застосування викопного палива. Електрохімічні технології накопичення, такі як акумулятори, вважаються найбільш бажаними для балансування енергосистем з інтенсивним ступенем використання змінних джерел енергії (VERs)[14].

За останні кілька років свинцево-кислотні акумулятори вплинули на впровадження енергетичних систем. Головною причиною є їх економічна вигідність і надійність. На противагу цьому, цим системам накопичення енергії складно задовольнити вимоги інтенсивних циклічних режимів і досягти високих швидкостей заряду/розряду через глибину розряду (DOD) [15], яка не

перевищує 50%. Мікро мережі, підключені до електромережі, звільняють свинцево-кислотні акумулятори від напружених умов роботи, сповільнюючи їхній термін служби. Для мінімізації деградації в системах накопичення енергії необхідно регулярно проводити вирівнюючи заряди. Це потребує контрольованого джерела, зазвичай дизель-генератора, що призводить до додаткових експлуатаційних витрат і витрат на обслуговування. Деградація пов'язана з паралельно/послідовним з'єднанням елементів[16].

Під час роботи системи накопичення енергії неоднорідні елементи можуть спричиняти несиметричні падіння напруги в кожній групі. Це вимагає заміни цих елементів, щоб уникнути пошкодження всієї групи. З технічної точки зору, це ілюструє необхідність регулярного моніторингу елементів, що не підходить для мікро мереж, підключених до електромережі. Звичайні свинцево-кислотні акумулятори незручні для застосування в системах з переривчастою генерацією і не допускають глибоких розрядів. Отже, у світі все ще є багато систем, які зазнають прискореного скорочення терміну служби[17].

Останнім часом літій-іонні акумулятори [18] широко використовуються в енергомережах завдяки їхньому низькому рівню обслуговування, високій безпеці та об'ємній і високій енергетичній щільності. Основним недоліком є їхня неекономічність, хоча вони, помірно, стають дедалі конкурентоспроможними. Крім того, вони чутливі до стабільності елементів і здатні створювати серйозні проблеми у разі пошкодження. Тим не менш, літій-іонні рішення включають складні схеми управління, які контролюють роботу елементів і змінюють робочу температуру для забезпечення ідеальної роботи системи накопичення енергії[19].

## **1.2. Експлуатація літій-іонних та свинцево-кислотних акумуляторів**

### **1.2.1. Свинцево-кислотні акумулятори**

Свинцево-кислотні акумулятори є одним із найпоширеніших типів вторинних джерел електроенергії, що широко застосовуються в автомобільній техніці, системах резервного живлення та промислового обладнанні. Їхня

популярність зумовлена поєднанням відносно низької вартості, технологічної зрілості та здатності забезпечувати значні пускові струми.

Принцип роботи таких акумуляторів ґрунтується на оборотних електрохімічних реакціях між діоксидом свинцю на позитивній пластині, губчастим свинцем на негативній пластині та водним розчином сірчаної кислоти, що виконує роль електроліту. Під час розряду активні матеріали обох пластин перетворюються переважно на сульфат свинцю, а концентрація електроліту знижується; під час заряду процес відбувається у зворотному напрямі. Така схема забезпечує надійність і передбачуваність характеристик у широкому діапазоні умов експлуатації.

Свинцево-кислотні (LA) акумулятори можна розділити на дві різні категорії: заливні та герметичні/клапанно-регульовані. Принцип роботи свинцево-кислотних акумуляторів є базовим. У розрядженому стані, обидві, позитивна та негативна, пластини стають сульфатом свинцю (II) ( $PbSO_4$ ), а електроліт втрачає значну частину своєї дисоційованої сірчаної кислоти та переважно перетворюється на воду. На процес розряду впливає помітна втрата енергії, коли  $2H^+$ (водн.) (гідратовані протони) кислоти реагують з іонами  $O^{2-}$  з  $PbO_2$ , утворюючи міцні O-H зв'язки у  $H_2O$ . Ця інтенсивна екзергонічна процедура додатково компенсує активно критичний розвиток іонів  $Pb^{2+}$  (водн.) або сульфату свинцю ( $PbSO_4$ ) [20].

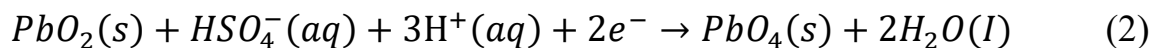
#### **1.2.1.1. Реакція на негативній пластині**

Вивільнення двох провідних електронів надає свинцевому електроду негативного заряду. У міру накопичення електронів, вони створюють електричне поле, яке притягує іони водню та відштовхує сульфат-іони, що призводить до утворення подвійного шару біля поверхні. Іони водню екранують заряджений електрод від розчину, обмежуючи подальшу реакцію, якщо заряд не виводиться з електрода.



### 1.2.1.2. Реакція на позитивній пластині

Використовуючи перевагу металевої провідності  $PbO_2$ , у зарядженому стані негативна пластина складається зі свинцю, а позитивна пластина – з діоксиду свинцю. Електролітний розчин значною мірою концентрований у водній сірчаній кислоті, яка зберігає більшість хімічної енергії.



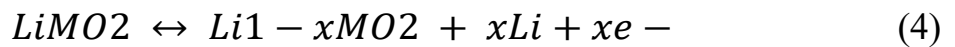
Отже, свинцево-кислотні акумулятори залишаються важливим елементом сучасної енергетичної інфраструктури завдяки своїй доступності та надійності, однак їх ефективне використання потребує відповідальної експлуатації й належного поводження з відходами.

### 1.2.2. Літій-іонні акумулятори

Літій-іонні акумулятори є одним із найважливіших досягнень сучасної електрохімії та основою розвитку портативної електроніки й електротранспорту. Їхня популярність зумовлена високою питомою енергоємністю, відносно малою масою та здатністю багаторазово перезаряджатися без істотної втрати працездатності на початкових етапах експлуатації. Завдяки цим властивостям такі акумулятори широко застосовують у смартфонах, ноутбуках, електроінструментах, системах накопичення енергії та електромобілях.

Ця технологія існує менше ніж пів століття. Її визнано в електронній та транспортній промисловості, головним чином у контексті продуктивності плагін-гібридних електромобілів (PHEV) та впровадження енергетичних систем[21]. Її негативний електрод складається з графіту, тоді як позитивний електрод складається з оксид літію-кобальту (III) ( $LiCoO_2$ ) або порошок діоксиду літію-нікелю ( $LiNiO_2$ ); розчин електроліту складається з солі літію, такої як гексафторфосфат літію ( $LiPF_6$ ) або перхлорат літію  $LiClO_4$ , розчиненого в розчині "органічного карбонату". Катіони літію переміщуються до анода під час заряджання та до катода під час розряджання – форма хімічної реакції "інтеркаляції"[22]. Рівняння (3) та (4) відображають оборотні реакції,

необхідні в зарядженому/розрядженому станах на негативному та позитивному електродах, відповідно [23].



Отже, літій-іонні акумулятори залишаються ключовим елементом енергетичного переходу та цифрової інфраструктури. Подальші дослідження, спрямовані на підвищення безпеки, довговічності та екологічності, визначатимуть їхню роль у майбутніх технологічних системах.

### **Висновок до першого розділу**

У розділі обґрунтовано актуальність мережевих мікро мереж із відновлюваними джерелами енергії (ВДЕ) та системами накопичення енергії як одного з ключових напрямів модернізації електроенергетики в умовах стрімкого зростання світового попиту на електроенергію та необхідності скорочення викидів CO<sub>2</sub> від традиційної генерації.

Розкрито роль мікро мереж як гнучких локальних енергосистем, що інтегрують розподілену генерацію та споживачів і можуть працювати в мережевому, автономному та аварійному режимах. Наголошено, що саме мережевий режим через точку спільного приєднання забезпечує взаємодію з магістральною системою, але водночас підвищена частка змінних ВДЕ створює труднощі підтримання балансу потужності, частоти та напруги. У зв'язку з цим підкреслено визначальне значення систем накопичення електричної енергії (ESS) для згладжування короткострокових і сезонних коливань генерації, перенесення енергії в часі (заряд у періоди низького попиту та розряд у пікові періоди) й підвищення стійкості енергосистеми.

Окремо проаналізовано експлуатаційні особливості свинцево-кислотних та літій-іонних акумуляторів як найбільш поширених електрохімічних технологій для мікромереж. Встановлено, що свинцево-кислотні рішення є економічно доступними й надійними, але обмежені за глибиною розряду, чутливі до інтенсивного циклування, потребують контролю та вирівнювальних зарядів, що ускладнює довготривалу експлуатацію. Літій-іонні акумулятори

мають вищу енергетичну щільність, довший ресурс і нижчі вимоги до обслуговування, однак залишаються дорогими та потребують розвинених систем керування для забезпечення безпеки й стабільності елементів.

## РОЗДІЛ 2

### МОДЕЛЮВАННЯ ОБЛАДНАННЯ МІКРО МЕРЕЖІ

Мікро мережі (*MGs*) є характеристикою, що розвивається в секторі електроенергетики, демонструючи альтернативну схему переходу від віддалених центральних електростанцій до наближення розподіленої генерації до споживачів. Мікро мережі відрізняються від інших енергетичних мереж завдяки їхній стійкості, адаптивності та послідовним операціям, що дозволяють виконувати послуги, які роблять енергосистему більш конкурентоспроможною. *MGs* генерують стійку, економічно ефективну, екологічно чисту енергію та покращують роботу й надійність локалізованої електромережі [24]. Отже, енергія виробляється поблизу навантажень, що дозволяє використовувати мало масштабні генератори, які підвищують надійність і зменшують втрати на протяжних лініях електропередачі.

Локальність системи мікро мережі сприяє поліпшенню управління енергією. Генератори (і, можливо, навантаження) можуть управлятися локальною системою управління енергією (*EMS*) для оптимізації потоку потужності в мережі. Метою управління енергією є орієнтація на режим роботи: автономний або підключений до мережі. В автономному режимі головним завданням управління живленням є збалансування частоти та напруги системи. У режимі підключення до мережі загальною метою є зменшення вартості імпорту електроенергії в точці спільного підключення (*PCC*), підвищення коефіцієнта потужності в *PCC* та максимізація профілю напруги в межах *MG*[25,26]. Це дослідження присвячене мережам, підключеним до загальної мережі.

На рис. 2.1 представлено структуру мікро мережі (*MG*). Сонячні фотоелектричні (*PV*) модулі та акумуляторна батарея, як накопичувач енергії, безпосередньо підключені до шини постійного струму (*DC*). Шини змінного (*AC*) та постійного (*DC*) струму інтегровані за допомогою двонаправленого *AC/DC* з'єднувального перетворювача. До шини постійного струму (*DC*) підключене спорадичне навантаження постійного струму. Перетворювачі

потужності взаємопов'язано керують потоком потужності відносно системи керування енергією (EMS) через лінію передачі електроенергії. Інтегрований AC/DC перетворювач має вирішальне значення для встановлення регуляторної техніки.

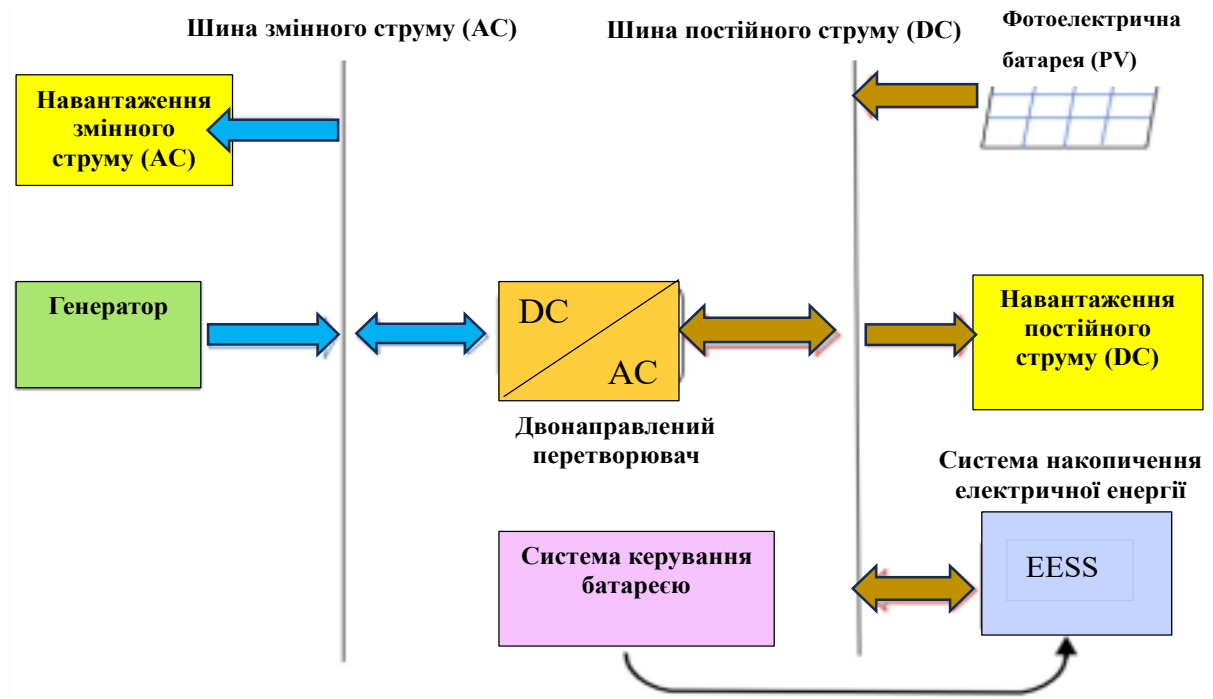


Рисунок 2.1 Схема мікро мережі, підключеної до електромережі.

## 2.1. Сонячні фотоелектричні батареї та виробництво електроенергії

Еквівалентна фотоелектрична система показана на рис. 2.2, і наведено відповідні рівняння. Фотоелектрична батарея підключена до загальної шини постійного струму. Фотоелектрична батарея складається з сонячних модулів Canadian Solar CS6U-330P. Сонячні модулі з'єднані послідовно та паралельно, утворюючи батарею[27]. Сонячний модуль можна представити як джерело струму, паралельно з'єднане з діодом. На рис. 2.3 показано змінність вихідної сонячної потужності, що генерується фотоелектричною батареєю. За різних рівнів сонячної радіації періоди максимальної потужності P-V кривих корелюють зі змінними вихідними напругами. Фотоелектрична система повинна використовувати техніку відстеження точки максимальної потужності (MPPT) для оптимізації сонячної енергії від сонячних електростанцій[28]. Вищезазначеного можна досягти шляхом калібрування вихідної напруги

фотоелектричної батареї та регулювання підвищуючого перетворювача. У підключеному до мережі стані підвищуючи перетворювач може працювати в режимі on-MPPT або off-MPPT, враховуючи стабільність потужності енергосистеми та стан заряду (SoC) електрохімічної системи накопичення енергії.

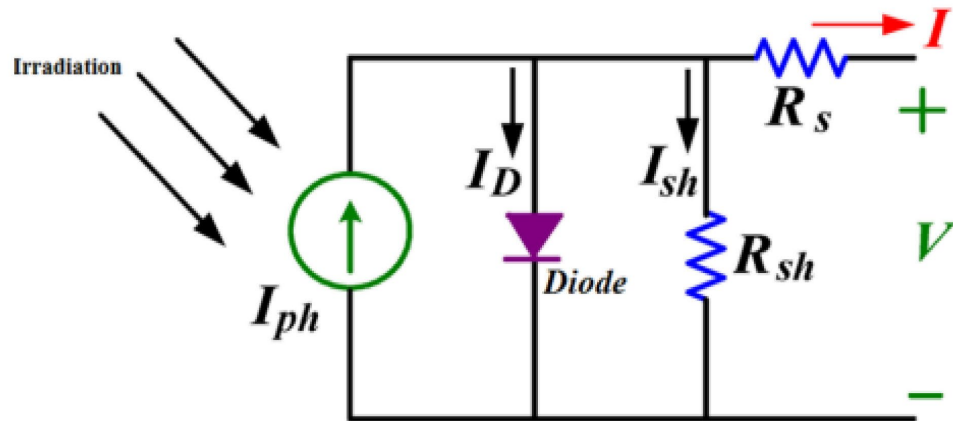


Рисунок 2.2 Еквівалентна схема сонячної ФЕМ [29].

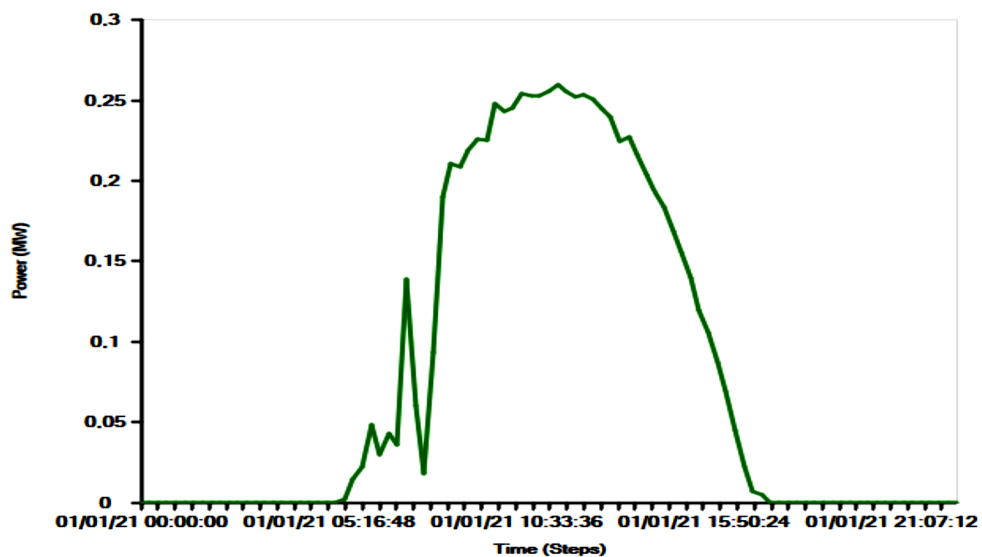


Рисунок 2.3 Вихідна потужність фотоелектричної станції.

### 2. 1.1. Струм навантаження в амперах

У рівнянні нижче

$$I = I_{PH} - I_{SH} - I_D \quad (5)$$

### 2.1.2. Напруга на шунтових гілках

У рівнянні нижче

$$V_{SH} = V_{PH} + V_{RS} \quad (6)$$

### 2.1.3. Струм через шунтувальний резистор

У рівнянні нижче

$$I_{SH} = \frac{V_{SH}}{R_{SH}} = \frac{V_{PH} + I R_S}{R_{SH}} \quad (7)$$

### 2.1.4. Характеристичне рівняння модуля

$I_{PH}$  – це фотоелектричний струм,  $I_{SH}$  позначає струм на шунтуючи опір,  $I_D$  – представляє струм діода,  $I_0$  – це зворотний струм насичення,  $V_{SH}$  відображає напругу на шунтуючому опорі,  $V_{PH}$  представляє напругу на навантаженні,  $V_{RS}$  – це напруга на послідовному опорі,  $R_{SH}$  позначає еквівалентний паралельний шунтуючи опір,  $R_S$  – це послідовний опір,  $n$  – позначає кількість модулів, а  $T$  представляє абсолютну температуру p-n переходу.

$$I = I_{PH} - I_0 \left[ \frac{V_{OC}}{e^{nVT} - 1} \right] - \frac{V_{OC}}{V_{SH}} \quad (8)$$

## 2.2. Модель системи накопичення енергії

У цій роботі акумулятор безпосередньо під'єднано до загальної шини постійного струму через двонаправлений підвищувальне-знижувальний перетворювач для інтегрованого заряду або розряду; він під'єднаний до шини змінного струму, як показано на рисунку 1. Акумулятор необхідний для покращення продуктивності мікро мережі. Цей пристрій реагує на короточасні збурення та зміни сонячного випромінювання. Кількість і ємність акумуляторів у кожному ланцюжку регулюються відповідно до потужності та вихідної напруги фотоелектричної генерації[29].

Акумулятори в застосованій системі мікро мережі використовуються як пристрої зберігання енергії. Акумуляторна система буферизує надлишкову енергію під час низького енергоспоживання та віддає накопичену енергію під час пікового попиту або коли генерується недостатньо електроенергії від фотоелектричної системи. Обсяг енергії, яку може накопичувати акумулятор, розраховується наступним чином:

$$B_{bat} = B_{bat.0} + \int_0^t V_{bat} I_{bat} dt \quad (9)$$

де  $B_{bat.0}$  вказує на попередній заряд батареї,  $V_{bat}$  та  $V_{bat}$  – це струм і напруга батареї, відповідно [30]. Точне наближення стану заряду (SoC) є необхідною умовою для обчислення енергетичної придатності батареї. SoC батареї змінюється з часом, що можна проілюструвати рівнянням (10):

$$\frac{SOC(t)}{SOC(T-1)} = \int_{T-1}^T \frac{P_{bat}(t)\eta_{bat}}{V_{bat}} dt \quad (10)$$

де  $U_{bat}$  – напруга шини модельованої системи MG,  $\eta_{bat}$  вказує на загальний коефіцієнт корисної дії (ККД) акумуляторної батареї. Потужність, що генерується акумуляторною батареєю, позначається як  $P_{bat}(t)$  [31]. Отже, загальний ККД акумуляторної батареї показано нижче:

$$\eta_{bat} = \sqrt{\eta_{bat}^c \eta_{bat}^d} \quad (11)$$

де  $\eta_{bat}^d$  і  $\eta_{bat}^c$  позначають ефективність розряду та заряду акумуляторної системи, відповідно [31]. Максимальне значення SoC зображено як 'SOCmax', яке дорівнює сукупній ємності акумуляторної батареї ( $C_n(Ah)$ ), і може бути проілюстровано як:

$$C_n(Ah) = \frac{N_{bat}}{N_{bat}^s} C_b(Ah) \quad (12)$$

де  $N_{bat}$  позначає загальну кількість акумуляторів,  $C(Ah)$  ілюструє ємність одного акумулятора,  $N_{bat}^s$  – кількість акумуляторів, з'єднаних послідовно. Мінімальне обмеження розряду акумуляторної батареї визначається як 'SOCmin'. Це обмеження зазвичай залежить від типу акумулятора та його використання в акумуляторній батареї[32]. Акумулятори з'єднуються послідовно для досягнення необхідної напруги шини. Кількість акумуляторів, з'єднаних послідовно для досягнення необхідної напруги, показано нижче:

$$N_{bat}^s = \frac{V_{bus}}{V_{bat}} \quad (13)$$

де  $V_{bat}$  позначає номінальну напругу одного акумулятора. Крім того, значення максимальної потужності заряду/розряду акумулятора в будь-який момент часу показано наступним чином:

$$P_{bat}^{max} = \frac{N_{bat} V_{bat} I_{bat}^{max}}{1000} \quad (14)$$

Таблиця 1. Характеристики акумуляторів.

| Критерій                                          | Тип/модель акумулятора        | Тип/модель акумулятора  |
|---------------------------------------------------|-------------------------------|-------------------------|
|                                                   | Свинцево-кислотний акумулятор | Літій-іонний акумулятор |
| Виробник                                          | C&D Tech                      | Kokam                   |
| Модель                                            | KCR                           | 120216216               |
| Загальна ємність (А·год)                          | 3816                          | 3816                    |
| Номінальна напруга елемента (В)                   | 2.063                         | 3.3                     |
| Розмір рядка                                      | 12                            | 12                      |
| Термін служби акумулятора на максимумі DOD        | 800                           | 3200                    |
| Термін служби (роки)                              | 4                             | 12                      |
| Зворотна постійна часу в АН-1                     | 0.774                         | 0.038                   |
| Поляризаційна константа у вольт/А·год             | 0.0002                        | 0                       |
| Внутрішній опір в Омах на позитивну пластину      | 0.00266                       | 0.0007                  |
| Ємність акумулятора в А·год на позитивну пластину | 26.5                          | 53                      |
| Струм розряду акумулятора в амперах               | 26.5                          | 53                      |
| Постійний струм (А)                               | 50                            | 53                      |
| Постійна напруга (V)                              | 2.2                           | 4.15                    |

### Висновок до другого розділу

У розділі 2 розглянуто та сформовано математичні моделі основних елементів мікро мережі, підключеної до загальної електромережі, з акцентом на узгоджену роботу генерації, накопичувача та перетворювальної техніки під керуванням системи EMS. Показано, що мікро мережа як локалізована енергосистема підвищує надійність і керованість електропостачання, зменшує

втрати в лініях та дозволяє оптимізувати режими роботи в точці спільного приєднання (РСС) — зокрема мінімізувати вартість імпорту електроенергії, покращувати коефіцієнт потужності та профіль напруги.

Для сонячної фотоелектричної підсистеми наведено еквівалентну електричну схему (джерело струму з діодом і шунтувальними/послідовними опорами) та базові рівняння, які описують взаємозв'язок струму й напруги модуля. Підкреслено ключову роль MPPT-керування та можливість роботи перетворювача в режимах on-MPPT/off-MPPT залежно від умов енергосистеми й стану заряду акумулятора, що забезпечує підвищення ефективності використання сонячної енергії та стабільність роботи.

Також побудовано модель системи накопичення енергії (акумуляторної батареї), підключеної до DC-шини через двонаправлений DC/DC перетворювач, що забезпечує заряд/розряд і згладжування коливань генерації та навантаження. Описано енергетичний баланс батареї, розрахунок SoC, урахування ККД зарядно-розрядних процесів, обмеження SoC та визначення кількості послідовно з'єднаних елементів і максимальної потужності. Наведені параметри свинцево-кислотного та літій-іонного акумуляторів демонструють вплив типу накопичувача на ресурс, внутрішні втрати й придатність до циклічної роботи.

Отже, отримані моделі PV-генератора та акумуляторної системи, разом із описом структури MG, створюють основу для подальшого аналізу потоків потужності, налаштування алгоритмів EMS та оцінювання ефективності роботи мікро мережі в мережевому режимі.

## РОЗДІЛ 3

### ОСНОВНА ЕНЕРГОСИСТЕМА (МЕРЕЖА)

Розглянемо MG (Мікро мережа/Основна Енергосистема) яка працює в режимі інтеграції з енергосистемою загального користування (електромережою). У такому режимі електроенергія з мережі доступна більшість годин доби. Коли потужності живлення недостатньо для задоволення потреб навантаження постійного струму (DC) через змінну генерацію електроенергії з відновлюваних джерел, електромережа та накопичувач енергії забезпечуватимуть живлення навантаження. Крім того, електромережа та фотоелектрична (PV) система можуть заряджати акумуляторну батарею за певних обставин.

#### 3.1. Силовий електронний інтерфейс (CEI)

Силовий електронний інтерфейс, зокрема, двонаправлений перетворювач, реалізований для інтеграції мікро мережі з існуючою енергосистемою з метою підвищення функціональності системи мікро мережі. Це досягається шляхом з'єднання шин змінного струму (AC) та постійного струму (DC), охоплюючи інші компоненти (фотоелектрична батарея, акумулятор та навантаження) мікро мережі, як показано на рисунку 1. Силовий електронний інтерфейс має декілька характеристик; його можна використовувати як випрямляч або інвертор, і він класифікується за топологією перетворювача DC-DC, DC-AC, AC-AC та AC-DC. Величина потужності перетворювача в основному залежить від максимальної потреби в навантаженні  $P_L^{max}$ . Значення потужності силового електронного інвертора ( $P_{inv}$ ) можна отримати за допомогою рівняння, наведеного нижче:

$$P_{inv} = P_L^{max} / \eta_{inv} \quad (15)$$

Рис. 3.1 ілюструє трифазну двонаправлену топологію AC-DC перетворювача, який передає потужність між трифазною мережею змінного струму та шиною постійної напруги. Двонаправлений AC-DC інтерфейс містить шість IGBT-діодних ключів ( $Sa1 - Sc2$ ), які з'єднані з трифазною

мережею змінного струму послідовно з індуктивністю фільтра ( $L$ ) і опором ( $R$ ). DC конденсатор ( $C$ ) підключений паралельно до шини постійної напруги для підтримки напруги ( $e_L$ ) на постійному рівні. Двонаправлений АС-DC перетворювач працює в режимі випрямляча та інвертора. Режим випрямляча функціонує як вхідний випрямляч і дозволяє передавати потужність від трифазної мережі змінного струму до шини постійної напруги. Наступним режимом є режим інвертора; потужність передається від шини постійної напруги до трифазної мережі змінного струму, і інтерфейс діє як інвертор напруги.

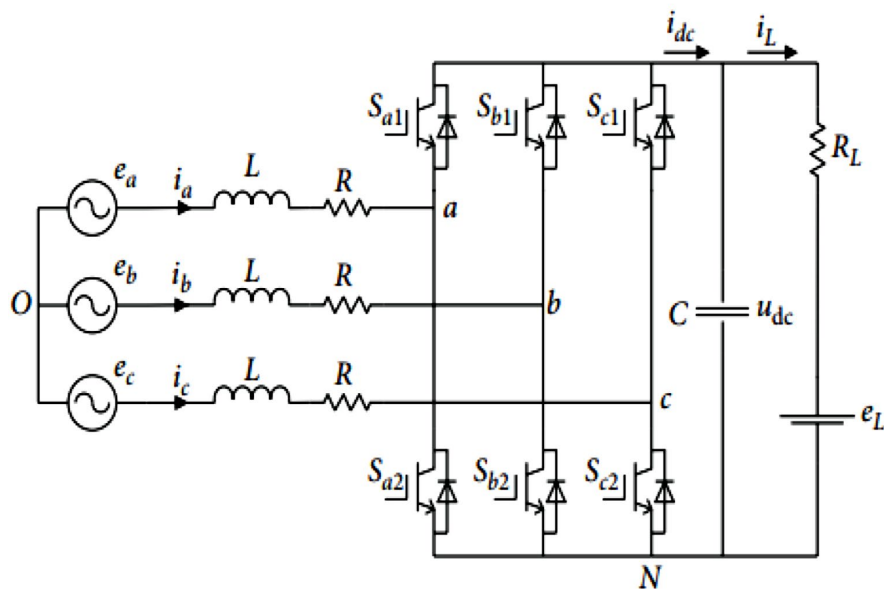


Рисунок 3.1 Топологія двонаправленого АС-DC перетворювача

### 3.2. Ілюстрація двонаправлених АС/DC перетворювачів

Топологія трифазного перетворювача напруги показана на рис. 3.1. Для підключення до мережі та перетворювача використовується L-фільтр. Оптимальне джерело змінної напруги мережі зображено як  $e_a, e_b, e_c, i_a, i_b, i_c$ , позначають струм джерела.  $L$  (індуктивність фільтра) і  $R$  (опір) – елементи послідовного R-L ланцюга.  $C$  (конденсатор) на стороні постійного струму, де  $u_{dc}$  та  $i_{dc}$  позначають напругу постійного струму та струм постійного струму, відповідно. Опір  $R_L$  і  $e_L$ , з'єднані послідовно, є еквівалентом навантаження

постійного струму. Застосовуючи закони Кірхгофа для струмів (KCL) і напруг (KVL), модель системи можна представити наступним чином [33]:

$$\begin{cases} e_a = L \frac{di_a}{dt} + Ri_a + u_{aN} + u_{NO}, \\ e_b = L \frac{di_b}{dt} + Ri_b + u_{bN} + u_{NO}, \\ e_c = L \frac{di_c}{dt} + Ri_c + u_{cN} + u_{NO}, \\ C \frac{du_{dc}}{dt} = i_{dc} - i_L, \end{cases} \quad (16)$$

де  $U_{aN}, U_{bN}, U_{cN}$ , описують напруги між точкою з'єднання N трьох фаз перетворювача, а  $U_{NO}$  – це напруга між двома точками N та O. Коли вмикаються ключі Sa1, Sb1, Sc1, а ключі Sa2, Sb2, Sc2 вимикаються, функція перемикання описується як  $S_k = 1$ . Коли вмикаються ключі Sa2, Sb2, Sc2, а Sa1, Sb1, Sc1 вимикаються, функція описується як  $S_k = 0$ . Отже,  $U_k$  може бути описано як [32]:

$$U_k = U_{kN} + U_{kNO} = S_k U_{NO}, \quad (k = a, b, c) \quad (17)$$

Фазові струми  $i_a + i_b + i_c = 0$ , і фазові напруги  $e_a + e_b + e_c = 0$ ; це справедливо для збалансованої трифазної системи без нейтрального провідника. Рівняння (12) може бути зображено як [33]:

$$\begin{cases} e_a = L \frac{di_a}{dt} + Ri_a + u_{dc} \left[ S_a - \frac{1}{3}(S_a + S_b + S_c) \right] \\ e_b = L \frac{di_b}{dt} + Ri_b + u_{dc} \left[ S_b - \frac{1}{3}(S_a + S_b + S_c) \right] \\ e_c = L \frac{di_c}{dt} + Ri_c + u_{dc} \left[ S_c - \frac{1}{3}(S_a + S_b + S_c) \right] \\ C \frac{du_{dc}}{dt} = i_a S_a + i_b S_b + i_c S_c - i_L, \end{cases} \quad (18)$$

### 3.3. Система управління енергоспоживанням

Представлена блок-схема на рис.3.2 використовується для керування енергією у моделі мікро мережі, підключеній до мережі[34]. Спочатку модель перевіряє згенеровану сонячну енергію ( $P_{Solar}$ ), попит на навантаження ( $P_{Load}$ ) та рівень заряду акумулятора ( $SoC_{bat}$ ). У разі будь-яких змін умов, визначається надлишок або дефіцит сонячної енергії. Після задоволення попиту на навантаження, якщо є надлишок енергії, то вона зберігається в накопичувачі енергії. Однак, для кращого керування акумулятором, його SoC

не повинен перевищувати 80%. Якщо рівень заряду досягнуто, надлишкова енергія постачається (продається) в основну мережу. Навпаки, коли сонячного випромінювання недостатньо, електроенергії, виробленої фотоелектричною системою, не вистачає для задоволення потреби в навантаженні. Отже, для задоволення потреби в навантаженні потрібні інші джерела енергії.

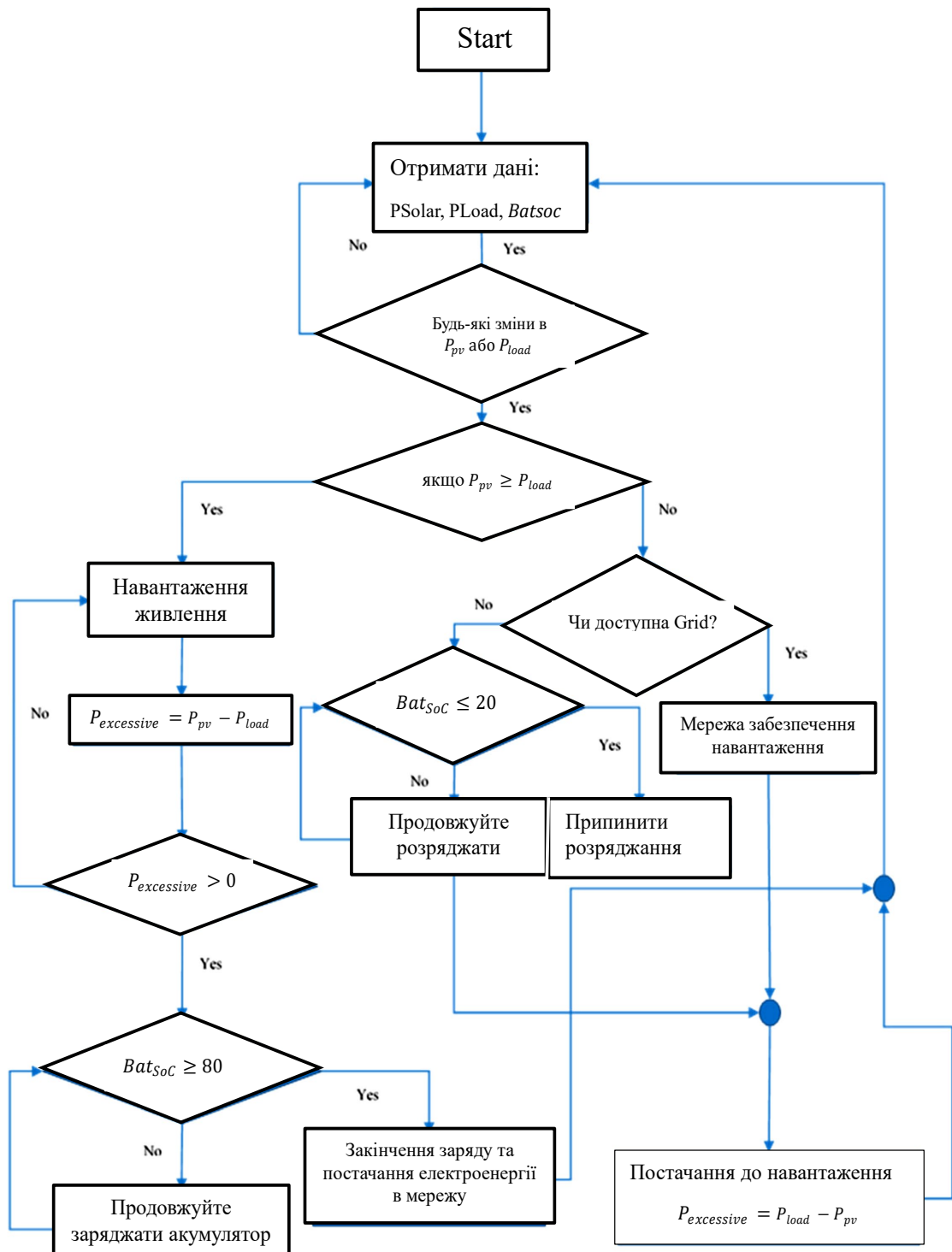


Рисунок 3.2 Блок-схема — функціонування джерел енергії

Перш ніж розглядати електромережу, перевага надається акумуляторній системі зберігання енергії (АСЗЕ) для забезпечення необхідного навантаження. Її експлуатують обережно для належного керування акумулятором, тому її стан заряду (SoC) не може бути нижчим за 20%. Електромережа постачатиме необхідне навантаження, якщо SoC досягне межі 20%. Якщо електромережа доступна, необхідна енергія  $P_{excessive} = P_{load} - P_{pv}$  купується з електромережі.

### **Висновок до третього розділу**

Робота мікро мережі (MG) в інтеграції з основною енергосистемою забезпечує підвищену надійність електроживлення DC-навантажень за рахунок доступності електроенергії з мережі впродовж більшості годин доби та можливості компенсації змінної генерації PV. Ключову роль у такій архітектурі відіграє силовий електронний інтерфейс (двонаправлений AC–DC перетворювач), який з’єднує AC- та DC-шини й дозволяє керовано передавати потужність у двох напрямках: у режимі випрямляча — від мережі до DC-шини (живлення навантаження/заряд АКБ), у режимі інвертора — від DC-шини до мережі (експорт надлишків). Потужність інтерфейсу визначається максимальною потребою навантаження та ККД перетворення.

## РОЗДІЛ 4

### АНАЛІЗ РЕЗУЛЬТАТІВ МОДЕЛЮВАННЯ

#### 4.1 Аналіз характеристик фотоелектричної (PV) системи та параметри акумуляторної батареї

Для досягнення мети дослідження в цьому аналізі було використано програмне забезпечення ETAP 20.6. Передбачається, що температура та сонячне випромінювання змінюються. Задані кліматичні умови – спекотний, безхмарний день влітку. Проаналізовано характеристики фотоелектричної (PV) системи та параметри акумуляторної батареї. Сонячне випромінювання залежить від часу; на рисунку 6 проілюстровано та оцінено випромінювання з 15-хвилинним інтервалом.

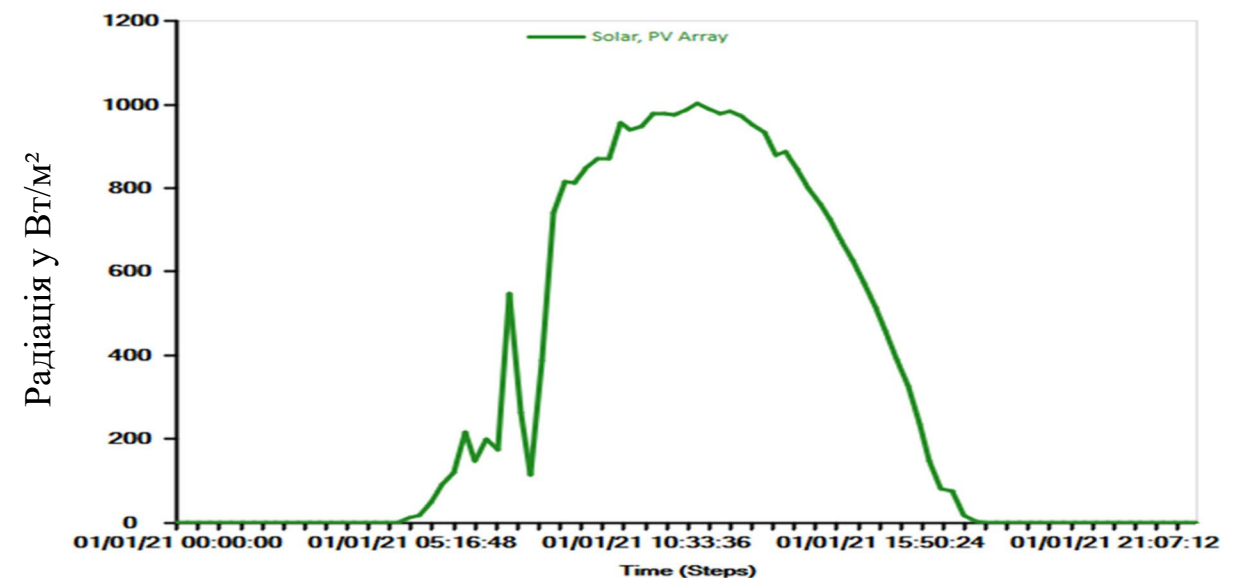


Рисунок 4.1 Сонячне випромінювання

Випромінювання прямо пропорційне продуктивності фотоелектричної батареї. На рис. 4.1 видно, що при збільшенні випромінювання збільшується і вихідна потужність. Якщо сонячна фотоелектрична система відчуває дефіцит випромінювання, її вихідна потужність знаходиться на найнижчому рівні, що призводить до неможливості забезпечити живлення навантаження в мікро мережі (MG). Відповідно, акумуляторна батарея компенсує необхідну потужність, яка має бути подана на навантаження. Крім того, акумуляторна батарея буде безперервно компенсувати навантаження, доки вихідна

потужність фотоелектричної системи не стане достатньою, або доки вона не досягне межі розряду, залежно від того, що настане раніше.

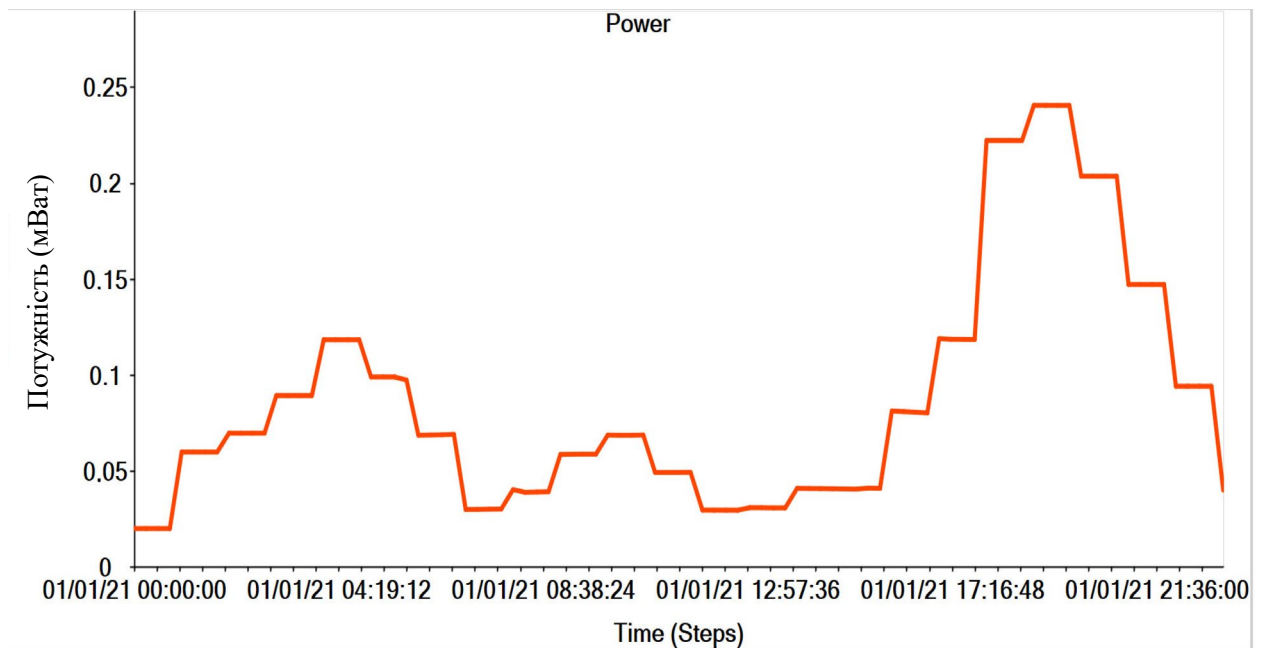


Рисунок 4.2 Добовий графік розподілу навантаження

На рис. 4.2 зображено добовий графік навантаження. Очевидно, що значне споживання електроенергії відбувається вранці, зростає з 05:30 до приблизно 12:00, а пікове навантаження спостерігається з 16:00 до 20:00. Причиною цього пікового навантаження є той час, коли більшість кінцевих споживачів використовують електроенергію для різних потреб. Протягом цього періоду сонце вже зайшло, і потужності від фотоелектричної системи недостатньо, отже, виникає потреба у функціональній системі накопичення енергії.

Якщо накопичувач енергії досягає обмеження раніше, ніж очікувалося, основна мережа електропостачання буде забезпечувати живлення навантаження за підтримки силового електронного інтерфейсу. Сонячне випромінювання використовується фотоелектричною (ФЕ) системою в період з 05:00 до 18:00. Інтенсивність сонячного випромінювання коливається між 0 Вт/м<sup>2</sup> і 1000 Вт/м<sup>2</sup>, показано на рис. 4.3. Продуктивність системи мікро мережі (ММ) є наступною:

Джерела енергії ММ (акумулятор і ФЕ система) відповідають за забезпечення живлення підключеного змінного навантаження постійного

струму. Система накопичення енергії залежить від надлишкової вихідної потужності від ФЕ системи та електромережі для функціонування.

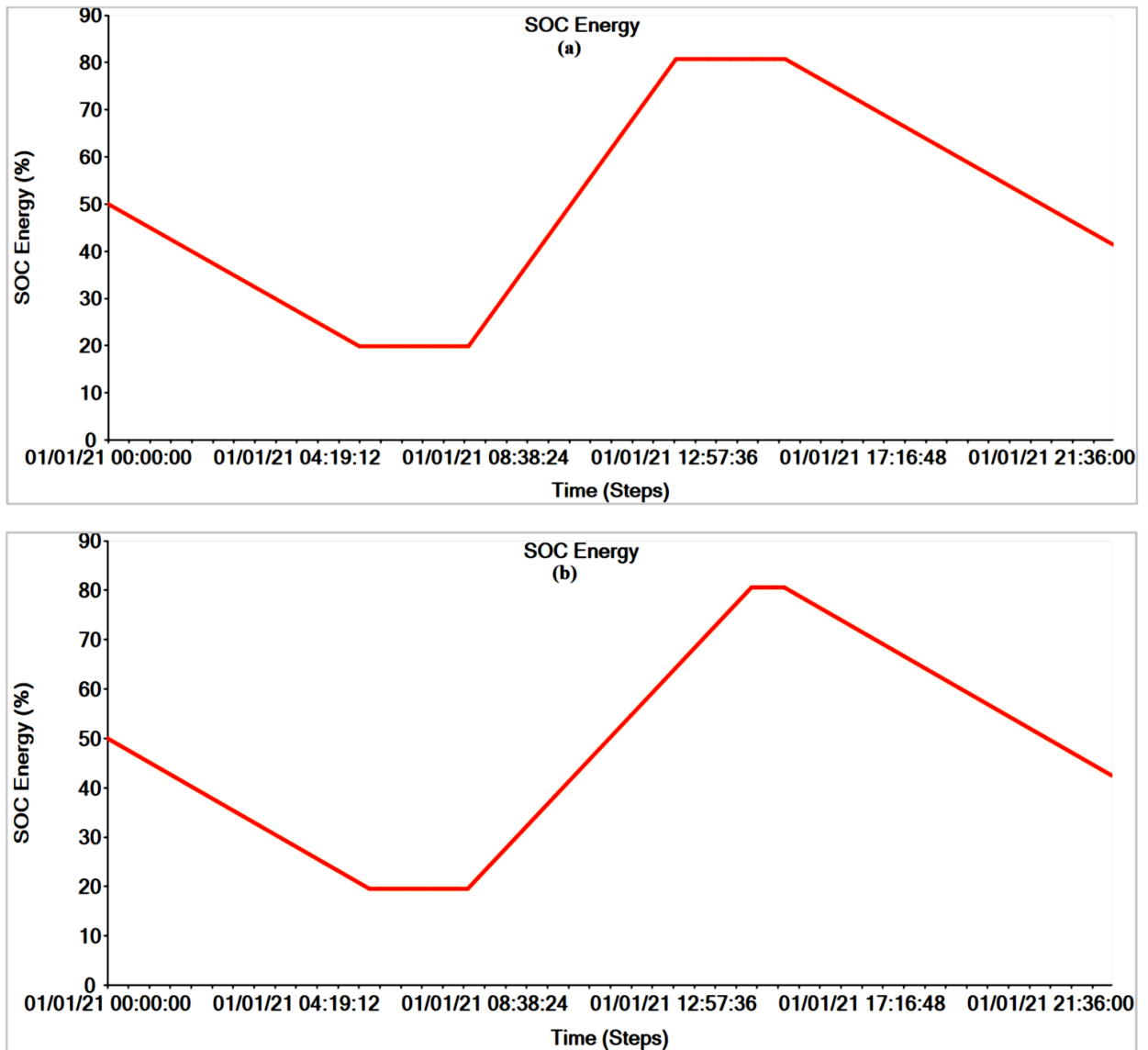


Рисунок 4.3 (а) Стан заряду (*SoC*) літій-іонного акумулятора та (b) LA

Ця надлишкова потужність повинна бути більшою, ніж змінне навантаження, щоб її можна було накопичувати для подальшого використання. Налаштування BMS (Системи управління акумулятором) встановлені таким чином, що коли вихідна потужність ФЕ системи (шина постійного струму) менша, ніж потреба в навантаженні, акумулятор забезпечує решту необхідної потужності. Це залежить від того, чи вже досягнув акумулятор межі відключення заряду або розряду. Отже, необхідна додаткова потужність буде надана мережею. Рекомендовано, щоб оптимальні

межі стану заряду (*SoC*) становили 20 і 80 відсотків [34]. Це допомагає запобігти глибокому розряду та перезарядженню акумулятора; отже, продовжує термін служби акумулятора. Обмеження показані на рисунках 8a,b.

#### **4.2. Ефективність використання акумуляторів**

Ефективність акумулятора є важливим фактором, який слід враховувати при порівнянні різних систем зберігання енергії. У цьому випадку однакові межі заряду та розряду (20–80%) встановлені для обох акумуляторів, щоб продемонструвати поріг, який може бути прийнятним для зменшення зношування акумуляторів. Як правило, літій-іонні акумулятори мають ефективність 95 відсотків або навіть більше, що означає, що 95 відсотків або більше енергії, збереженої в літій-іонному акумуляторі, може бути ефективно використано. Навпаки, ефективність свинцево-кислотного акумулятора становить приблизно від 80 до 85 відсотків. Більша ефективність акумулятора означає можливість швидшої зарядки відповідно до глибини розряду, підвищена ефективність означає більшу оперативну ємність акумулятора. Крім того, відносно конфігурації системи, це може мінімізувати експлуатаційні витрати, тобто зменшити кількість сонячних панелей, зменшити ємність акумулятора та мати менший резервний генератор (за потреби)[15].

#### **4.3. Термін служби**

Використовувані акумулятори з часом деградують і стають непридатними з віком. Розрядження акумулятора для живлення навантаження та зарядження акумулятора сонячною енергією або від електромережі вважається одним «циклом» з 08:30 до моменту, коли один з процесів досягає ліміту заряду. Літій-іонні акумулятори можуть витримувати великі струми, залишаючись функціональними та зберігаючи енергію до наступного розряду. На відміну від цього, термін служби свинцево-кислотного акумулятора погіршуватиметься набагато швидше. Очевидно, що невдовзі після досягнення ліміту заряду він піддається розряду для забезпечення живлення навантаження. Це доводить, що обидва використовувані акумулятори можуть

більш ніж втричі або вчетверо перевищити свій передбачуваний термін служби завдяки встановленому обмеженню 20–80%. Відповідно, якби використовувався режим розряду 0–100%, це значно скоротило б термін служби акумуляторів. У цьому випадку акумулятор, який забезпечує значний час роботи, – це літій-іонний акумулятор.

#### **4.4. Економічна вигода**

Зелений тариф (Feed-in Tariff, FiT) – це політика, спрямована на забезпечення відшкодування витрат виробникам відновлюваної енергії. Крім того, виробникам електроенергії надається доступ до мережі, довгострокові контракти та ціни закупівлі, що базуються на витратах [35]. Досліджувана мікро мережа (MG) виявляється економічно вигідною. Це зумовлено тим, що вона може постачати електроенергію назад в основну мережу, особливо коли основна мережа зазнає нестабільності або є надлишок електроенергії з MG. Це полегшить навантаження на основну мережу та сприятиме фінансуванню інвестицій у відновлювану енергетику в MG. У цьому випадку літій-іонний акумулятор є кращим, оскільки він може швидше заряджатися, що дозволяє постачати надлишкову енергію, вироблену фотоелектричною (PV) системою, назад в мережу. Крім того, літій-іонні акумулятори можуть мати надмірні початкові витрати; однак, порівняно зі свинцево-кислотними (LA) акумуляторами, їх термін служби довший. Навпаки, короткий термін служби LA призводить до витрат на заміну.

#### **4.5. Безпека**

Літій-іонні (Li-ion) та свинцево-кислотні (LA) акумулятори зазвичай вважаються безпечними при використанні в межах прийнятних умов. Тому, перезарядження вважається найбільш регульованою практикою при використанні акумуляторів. У цьому випадку це досягається шляхом встановлення порогу заряду на рівні 80%. Зарядження акумулятора понад його межі може призвести до теплового розгону (підвищення температури), що є значною причиною вибухів акумуляторів[36,37]. Оскільки літій-іонні акумулятори значно щільніші, ніж свинцево-кислотні, ступінь їх

пошкодження є найбільшим. Середній струм заряджання літій-іонних акумуляторів є 561,65 А, а свинцево-кислотних – 471,03 А. Це доводить, що літій-іонні акумулятори більш імовірно зіткнуться з таким інцидентом.

#### **4.6. Екологічність**

Свинцево-кислотні (LA) акумулятори складаються із суміші свинцю та сірчаної кислоти. Свинець є надзвичайно небезпечним матеріалом, а сірчана кислота - агресивним електролітом. Крім того, свинцево-кислотні акумулятори не слід викидати на полігони твердих побутових відходів. Це пов'язано з тим, що вони можуть протікати та спричиняти забруднення, негативно впливаючи на навколишнє середовище. На відміну від них, літій-іонні (Li-ion) акумулятори містять надмірну кількість різних речовин (кобальт, мідь і літій) [38,39,40]. Вважається, що ці речовини не такі токсичні, як ті, що містяться в LA акумуляторах. Отже, переробка стає значною проблемою через небезпеки, пов'язані з використаними акумуляторами, особливо для свинцево-кислотних акумуляторів, які потребують частої заміни.

#### **Висновки до четвертого розділу**

Розглянута мікро мережа (MG), інтегрована з енергосистемою загального користування, забезпечує надійне живлення DC-навантаження за умов змінної генерації ВДЕ завдяки спільній роботі фотоелектричної системи, акумуляторного накопичувача та електромережі. Ключову роль у такій архітектурі відіграє силовий електронний інтерфейс - трифазний двонаправлений AC–DC перетворювач із L-фільтром і DC-ланкою, який забезпечує узгодження шин AC і DC та реалізує керовані режими випрямлення (передача потужності з мережі в DC-шину) і інвертування (передача потужності з DC-шини в мережу). Потужність інвертора визначається максимальною потребою навантаження та ККД перетворення, що дозволяє обґрунтовано обирати параметри CЕІ.

Запропонована система керування енергоспоживанням формує пріоритети розподілу потужності: надлишок PV-енергії спрямовується на заряд акумулятора до верхньої межі (80%), після чого надлишок передається

в мережу; при дефіциті генерації першочергово використовується акумулятор із обмеженням мінімального рівня заряду (20%), а за досягнення цієї межі дефіцит компенсується купівлею енергії з електромережі. Таким чином, мережевий режим роботи MG підвищує гнучкість і стабільність енергопостачання, а встановлені межі (*SoC*) забезпечують ресурсозбереження акумулятора та прогнозовану роботу накопичувача в складі мікромережі.

## ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У кваліфікаційній роботі було проведено аналіз технічних характеристик літій-іонних (Li-ion) та свинцево-кислотних (LA) акумуляторів та їх здатність витримувати змінні вимоги до навантаження постійним струмом (DC) у мікро мережі (MG). Роботу обох електрохімічних технологій зберігання енергії було досліджено у запропонованій системі MG з використанням профілю змінного навантаження постійним струмом. Було проведено всебічний огляд системи MG, підключеної до електромережі, з використанням комплексного програмного забезпечення, і критичні висновки цієї роботи представлені нижче:

- Було виявлено, що застосування електрохімічного накопичення енергії може допомогти змінним джерелам енергії (фотоелектричним системам) задовольнити загальний попит на енергію в представленій системі MG.

- На основі огляду літератури було встановлено, що обидва типи акумуляторів ефективно зберігають надлишкову енергію протягом періодів низького попиту на енергію та забезпечують збережену енергію під час періодів високого попиту.

- Використання електрохімічного накопичення енергії в MG, підключеній до загальної електромережі, є меншим, ніж при впровадженні в ізольованій MG.

- Електрична система, що містить значну кількість відновлюваної енергії, потребує відповідної кількості ефективних акумуляторів для зберігання та компенсації їх змінності.

- Система зберігання енергії може полегшити години пікового навантаження основної мережі, мінімізуючи витрати на комунальні послуги та викиди парникових газів (GHG). Як наслідок, це спонукає кінцевих споживачів до використання зеленої енергії.

- Очікується, що схема MG з літій-іонними акумуляторами як методом

буферизації буде більш сприятливою, ніж MG, що складається зі свинцево-кислотних акумуляторів. Це пов'язано з їх високою ефективністю та тривалим життєвим циклом. Відповідно, літій-іонні акумулятори вважаються кращою довгостроковою інвестицією.

– Свинцево-кислотні акумулятори все ще широко використовуються в різних системах завдяки їх економічній перевазі; однак вони мають низьку ефективність та щільність енергії. На основі результатів цієї роботи було виявлено, що літій-іонні акумулятори мають кращі характеристики зберігання та більш сприятливі для заміни свинцево-кислотних, і, відповідно, краще використовуються в мікро генераторних системах.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Furtado, A.T.; Perrot, R. Динаміка інновацій вітрової енергетики в Південній Африці та Бразилії: Technological and institutional lock-ins. *Innov. Dev.* 2015, 5, 263–278.
2. Shahzad, U. Потреба у відновлюваних джерелах енергії. *Energy* 2012, 2, 16–18.
3. Michaelides, E.E. Енергетика, електронне середовище та сталий розвиток; CRC Press: Boca Raton, FL, USA, 2018.
4. Leonard, M.D.; Michaelides, E.E.; Michaelides, D.N. Потреби у зберіганні енергії для заміни електростанцій на викопному паливі відновлюваними джерелами. *Renew. Energy* 2020, 145, 951–962.
5. Hanif, I.; Aziz, B.; Chaudhry, I.S. Викиди вуглецю по всьому спектру використання відновлюваної та невідновлюваної енергії в економіках Азії, що розвиваються. *Renew. Energy* 2019, 143, 586–595.
6. Dhundhara, S.; Verma, Y.P.; Williams, A. Техно-економічний аналіз літій-іонної та свинцево-кислотної акумулятора у мікро мережевих системах. *Energy Convers. Manag.* 2018, 177, 122–142.
7. Alahakoon, S. Значення сховищ енергії в майбутніх енергетичних мережах. *Енергетична процедура* 2017, 110, 14–19.
8. Rodriguez-Diaz, E.; Vasquez, J.C.; Guerrero, J.M. Потенційна енергоекономія за рахунок використання постійного струму для житлових застосувань: A Danish household study case. In *Proceedings of the 2017 IEEE Second International Conference on DC Microgrids (ICDCM)*, Nuremburg, Germany, 27–29 June 2017; pp. 547–552.
9. Khalid, A.; Stevenson, A.; Sarwat, A.I. Огляд технічних специфікацій для систем акумуляторного зберігання енергії, підключених до мережі мікромереж. *IEEE Access* 2021, 9, 163554–163593.
10. Tariq, M.; Poor, H.V. Виявлення та локалізація крадіжок електроенергії в мікро мережах, пов'язаних із мережею. *IEEE Trans. Smart Grid* 2016, 9, 1920–1929.

11. Yang, Y.; Bremner, S.; Menictas, C.; Kay, M. Визначення розміру системи зберігання енергії в акумуляторних системах відновлюваної енергетики: A review. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 2018, 91, 109–125.
12. Tan, K.M.; Babu, T.S.; Ramachandramurthy, V.K.; Kasinathan, P.; Solanki, S.G.; Raveendran, S.K. Розширення можливостей розумної мережі: 39, 102591.
13. Mbungu, N.T.; Naidoo, R.M.; Bansal, R.C.; Siti, M.W.; Tungadio, D.H. Огляд відновлюваних джерел енергії та інтеграції мережі для комерційних будівель. *J. Energy Storage* 2020, 29, 101385.
14. Castillo, A.; Gayme, D.F. Застосування зберігання енергії на рівні мережі в інтеграції відновлюваної енергетики: *Manag.* 2014, 87, 885–894.
15. Santos-Pereira, K.; Pereira, J.D.; Veras, L.S.; Cosme, D.L.; Oliveira, D.Q.; Saavedra, O.R. Springer: Berlin/Heidelberg, Germany, 2021; pp. 1–24.
16. Aziz, A.S.; Tajuddin, M.F.N.; Adzman, M.R.; Ramli, M.A.; Mekhilef, S. Energy management and optimization of a PV/diesel/battery hybrid energy system using a combined dispatch strategy. *Sustainability* 2019, 11, 683
17. Zou, C.; Zhang, L.; Hu, X.; Wang, Z.; Wik, T.; Pecht, M. A review of fractional-order techniques applied to lithium-ion batteries, lead-acid batteries, and supercapacitors. *J. Power Sources* 2018, 390, 286–296.
18. Hannan, M.A.; Wali, S.B.; Ker, P.J.; Abd Rahman, M.S.; Mansor, M.; Ramachan Ramamurthy, V.K.; Muttaqi, K.M.; Mahlia, T.M.I.; *Energy Storage* 2021, 42, 103023.
19. Tomaszewska, A.; Chu, Z.; Feng, X.; O’kane, S.; Liu, X.; Chen, J.; Ji, C.; Endler, E.; Li, R.; Liu, L.; et al. Lithium-ion battery fastcharging: A review. *ETransportation* 2019, 1, 100011.
20. Schmidt-Rohr, K. Як акумулятори накопичують і виділяють енергію: пояснення основ електрохімії. *J. Chem. Educ.* 2018, 95, 1801–1810.
21. Whittingham, M.S. History, evolution, and future status of energy storage. *Proc. IEEE* 2012, 100, 1518–1534.
22. Yang, Z.; Liu, J.; Baskaran, S.; Imhoff, C.H.; Holladay, J.D. Enabling

renewable energy—And the future grid—With advanced electricity storage. *Jom* 2010, 62, 14–23.

23. Wong, C. Large Scale Integration of Renewable Electrical Energy into the Electrical Grid. 2019. Available online: <https://kb.osu.edu/handle/1811/87570> (accessed on 4 October 2022).

24. Faisal, M.; Hannan, M.A.; Ker, P.J.; Hussain, A.; Mansor, M.B.; Blaabjerg, F. Review of energy storage system technologies in microgrid applications: Issues and challenges. *IEEE Access* 2018, 6, 35143–35164.

25. Levron, Y.; Guerrero, J.M.; Beck, Y. Optimal power flow in microgrids with energy storage. *IEEE Trans. Power Syst.* 2013, 28, 3226–3234.

26. Katiraei, F.; Iravani, R.; Hatziargyriou, N.; Dimeas, A. Microgrids management. *IEEE Power Energy Mag.* 2008, 6, 54–65.

27. Atiq, J.; Soori, P.K. Modelling of a grid connected solar PV system using MATLAB/Simulink. *Int. J. Simul. Syst. Sci. Technol.* 2017, 17, 45.1–45.7.

28. Premkumar, M.; Kumar, C.; Sowmya, R.; Pradeep, J. A novel salp swarm assisted hybrid maximum power point tracking algorithm for the solar photovoltaic power generation systems. *Autom. Casopis Za Autom. Mjer. Elektron. Računarstvo Komun.* 2021, 62, 1–20.

29. Mohamed, S.A.; El Sattar, M.A. A comparative study of P&O and INC maximum power point tracking techniques for gridconnected PV systems. *SN Appl. Sci.* 2019, 1, 1–13.

30. Das, B.K.; Hoque, N.; Mandal, S.; Pal, T.K.; Raihan, M.A. A techno-economic feasibility of a stand-alone hybrid power generation for remote area application in Bangladesh. *Energy* 2017, 134, 775–788.

31. Singh, S.; Singh, M.; Kaushik, S.C. Feasibility study of an islanded microgrid in rural area consisting of PV, wind, biomass and battery energy storage system. *Energy Convers. Manag.* 2016, 128, 178–190.

32. Han, J.; Zhou, X.; Lu, S.; Zhao, P. A three-phase bidirectional grid-connected AC/DC converter for V2G applications. *J. Control Sci. Eng.* 2020, 2020, 8844073.

33. Qian, K.; Gao, G.; Sheng, Z. A maximum current control method for three-phase PWM rectifier for the ITER in-vessel vertical stability coil power supply. *IEEE Trans. Plasma Sci.* 2018, 46, 1689–1693.
34. Prabhakar, B.M.; Ramprabhakar, J.; Sailaja, V. Estimation and controlling the state of charge in battery augmented photovoltaic system. (PESTSE), Bengaluru, India, 21–23 January 2016; IEEE: Piscataway, NJ, USA, 2016; pp. 1–6.
35. Gharehpetian, G.B.; Mousavi, M. *Distributed Generation Systems: Design, Operation and Grid Integration*; Butterworth-Heinemann: Oxford, UK, 2017.
36. Проблеми безпеки з літій-іонними акумуляторами <https://total-energo.com.ua/problemu-bezpeky-z-litii-ionnymy-akumuliatoramy/>
37. Типи акумуляторних батарей: повний огляд.  
<https://deps.ua/ua/knowegable-base/reference-information/10591.html>
38. Порівняння хімічних складів акумуляторних елементів для сучасних застосувань <https://www.wonderfulpcb.com/uk/blog/battery-cell-chemistries-comparison-energy-density-performance/>
39. Екологічність літійових акумуляторів. <https://forpeopleshop.com/shkoda-ta-koryst-litiievykh-akumuliatoriv/?srsltid=AfmBOorJ-dy5FhFu6nbnXG4LZwhPrzKsGcCFNzedg6NvFG4q5Lg9DePV>
40. Lesser, J.A.; Su, X. Design of an economically efficient feed-in tariff structure for renewable energy development. *Energy Policy* 2008, 36, 981–990.