

Центральноукраїнський національний технічний університет
Факультет будівництва, транспорту та енергетики
Кафедра “Електротехнічні системи та енергетичний менеджмент”

“Допущено до захисту”
Зав. кафедрою ЕТС та ЕМ
канд. техн. наук., професор
_____Петро ПЛЕШКОВ
“___” _____2024р.

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
за другим (магістерським) рівнем вищої
освіти
на тему
“Дослідження режимів роботи мікроенергетичної
системи із акумулюванням електроенергії”

Виконав здобувач вищої освіти
2 курсу магістратури, групи ЕЕ-23М
ОПП «Електротехнічні системи
електроспоживання»
спеціальності 141 «Електроенергетика,
електротехніка та електромеханіка»
_____Володимир ОДАРЧЕНКО
«___» _____2024 р.

Керівник роботи
канд. техн. наук, доцент
_____Валентин СОЛДАТЕНКО
«___» _____2024 р.

Рецензент _____

м. Кропивницький

Центральноукраїнський національний технічний університет

Факультет будівництва, транспорту та енергетики

Кафедра електротехнічних систем та енергетичного менеджменту

Рівень вищої освіти другий (магістерський)

Галузь знань 14 «Електрична інженерія»

Спеціальність 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

Освітньо-професійна програма «Електротехнічні системи електроспоживання»

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Завідувач кафедри ЕТС та ЕМ
канд. техн. наук, професор

Петро ПЛЄШКОВ.

«___» _____ 2024 р.

ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ ЗА ДРУГИМ (МАГІСТЕРСЬКИМ) РІВНЕМ ВИЩОЇ ОСВІТИ ЗДОБУВАЧА ВИЩОЇ ОСВІТИ

Одарченку Володимирі Миколайовичу

(прізвище, ім'я, по-батькові)

1. Тема роботи (проекту) Дослідження режимів роботи мікроенергетичної системи із акумулюванням електроенергії

Study of the modes of operation of a micro-energy system with electricity storage

2. Керівник роботи (проекту) Солдатенко Валентин Петрович, канд. техн. наук., доц.
(прізвище, ім'я, по-батькові, науковий ступінь, вчене звання)

3. Строк подання студентом роботи до захисту 01.12.2024 р.

4. Мета та завдання випускної кваліфікаційної роботи (проекту) Метою роботи є комплексне вивчення інноваційних підходів до управління процесами енергозбереження та моніторингу стану акумуляторних батарей з урахуванням специфічних вимог навантажувальних режимів у мікроенергетичній системі. Завдання роботи: здійснити аналіз мікроенергетичних системи із системами накопичення енергії як інноваційного підходу до децентралізації та оптимізації мереж електрозабезпечення; розглянути математичний апарат для моделювання роботи елементів мікроенергетичної системи із системою накопичення енергії; провести моделювання та аналіз роботи мікроенергетичної системи із системою накопичення електроенергії; розробити заходи з охорони праці та безпеки в процесі монтажу електроустановок мікроенергетичної системи.

5. Консультанти по роботі, із зазначенням розділів роботи

Розділ	Консультант	Підпис, дата	
		Завдання видав	Завдання прийняв
<i>Охорона праці</i>	<i>к.т.н, доц. Савеленко І.В.</i>		

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів випускної кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
<i>1</i>	<i>Вступ</i>	<i>11.10.2024 р.</i>	
<i>2</i>	<i>Мікроенергетичні системи як інноваційний підхід до децентралізації та оптимізації енергетичних мереж</i>	<i>18.10.2024 р.</i>	
<i>3</i>	<i>Математичне моделювання елементів мікроенергетичної системи з системою акумулювання електричної енергії</i>	<i>01.10.2024 р.</i>	
<i>4</i>	<i>Комп'ютерне моделювання роботи мікроенергетичної системи з дослідженням впливу системи накопичення енергії</i>	<i>15.11.2024 р.</i>	
<i>5</i>	<i>Охорона праці</i>	<i>22.11.2024 р.</i>	
<i>6</i>	<i>Загальні висновки</i>	<i>25.11.2024 р.</i>	
<i>7</i>	<i>Оформлення пояснювальної записки КР</i>	<i>27.11.2024 р.</i>	
<i>8</i>	<i>Оформлення презентаційної частини КР</i>	<i>29.11.2024 р.</i>	

Дата видачі завдання: «___» _____ 2024 р.

Підпис керівника _____ Валентин СОЛДАТЕНКО

Завдання прийнято до виконання: «___» _____ 2024 р.

Підпис здобувача _____ Володимир ОДАРЧЕНКО

АНОТАЦІЯ

Одарченко В.М. Дослідження режимів роботи мікроенергетичної системи із акумулюванням електроенергії.

Спеціальність 141 – «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка». – ОПП «Електротехнічні системи електроспоживання». – Центральноукраїнський національний технічний університет. – м. Кропивницький, 2024р.

Метою роботи є комплексне вивчення інноваційних підходів до управління процесами енергозбереження та моніторингу стану акумуляторних батарей з урахуванням специфічних вимог навантажувальних режимів у мікроенергетичній системі.

У кваліфікаційній роботі представлено комплексне дослідження режимів функціонування мікроенергетичної системи з акумулюванням електроенергії, спрямоване на вирішення актуальних завдань підвищення ефективності та надійності роботи розподільних електричних мереж.

Проведено аналіз мікроенергетичних систем з акумуляторними комплексами, визначено їхній потенціал для оптимізації та децентралізації електричних мереж.

Розроблено та обґрунтовано математичний апарат для моделювання складових елементів мікроенергетичної системи та прогнозування її поведінки в різних експлуатаційних режимах.

Здійснено комп'ютерне моделювання та аналіз отриманих результатів функціонування мікроенергетичної системи з накопиченням електроенергії, визначено її характеристики та потенційні переваги.

Розроблено комплекс обґрунтованих заходів з охорони праці та забезпечення безпеки під час монтажу електроустановок мікроенергетичної системи.

Ключові слова: відновлювані джерела енергії, мікроенергетична система, система накопичення електричної енергії, сонячна фотоенергетика

THE SUMMARY

Odarchenko V. Study of the modes of operation of a micro-energy system with electricity storage.

Specialty 141 – "Electric power, electrical engineering and electromechanics". – "Electrical power consumption systems". – Central Ukrainian National Technical University. – Kropyvnytskyi, 2024

The purpose of the work is comprehensive study of innovative approaches to managing energy saving processes and monitoring the condition of batteries, taking into account the specific requirements of load modes in a microenergy system.

The qualification work presents a comprehensive study of the operating modes of a micro-energy system with electricity storage, aimed at solving the current problems of increasing the efficiency and reliability of distribution power grids.

An analysis of micro-energy systems with battery complexes was conducted, their potential for optimizing and decentralizing power grids was determined.

A mathematical apparatus for modeling the components of a micro-energy system and predicting its behavior in various operating modes was developed and substantiated.

Computer modeling and analysis of the obtained results of the operation of a micro-energy system with electricity storage were carried out, its characteristics and potential advantages were determined.

A set of substantiated measures for labor protection and ensuring safety during the installation of electrical installations of a micro-energy system was developed.

Key words: renewable energy sources, microenergy system, electrical energy storage system, solar photoenergy

ЗМІСТ

АНОТАЦІЯ	4
ЗМІСТ	6
ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ	8
ВСТУП	9
РОЗДІЛ 1 МІКРОЕНЕРГЕТИЧНІ СИСТЕМИ ЯК ІННОВАЦІЙНИЙ ПІДХІД ДО ДЕЦЕНТРАЛІЗАЦІЇ ТА ОПТИМІЗАЦІЇ ЕНЕРГОМЕРЕЖ	12
1.1 Трансформація енергосистеми України: технічні рішення та адаптація в умовах воєнних дій.....	12
1.2 Мікроенергетичні системи як інструмент модернізації розподільчих мереж.....	13
1.3 Види мікроенергетичних систем, їх особливості та технології застосування.....	16
1.4 Типологія, принципи функціонування та перспективи інтеграції в мікроенергетичні системи систем накопичення електроенергії.....	20
1.5 Аналіз алгоритмів розрахунку електроенергетичного балансу в системах з відновлюваними джерелами живлення.....	28
Висновки до першого розділу.....	31
РОЗДІЛ 2 МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ЕЛЕМЕНТІВ МІКРОЕНЕРГЕТИЧНОЇ СИСТЕМИ З СИСТЕМОЮ АКУМУЛЮВАННЯ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ	33
2.1 Методологія проектування та керування мережевою фотоелектричною системою з акумуляторним накопиченням енергії.....	33
2.2 Математична модель системи PV-ACHE.....	37
2.3 Математична модель фотогенерації PV-установкою.....	38
2.4 Математична модель процесів накопичення енергії.....	39
2.5 Моделювання показника економічної ефективності роботи.....	40

2.6 Часовий аналіз вартісних показників системи PV-АСНЕ	42
Висновки до другого розділу	54
РОЗДІЛ 3 КОМП'ЮТЕРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ РОБОТИ	
МІКРОЕНЕРГЕТИЧНОЇ СИСТЕМИ З ДОСЛІДЖЕННЯМ ВПЛИВУ	
СИСТЕМИ НАКОПИЧЕННЯ ЕНЕРГІЇ	56
3.1 Методологія управління активними розподільчими мережами	56
3.2 Аналіз архітектурних та функціональних особливостей мікроенергетичних систем	58
3.3 Оптимізація енергетичних потоків у мікроенергетичних системах з використанням інтелектуальних систем керування.....	64
3.4 Структура, особливості та механізми управління режимами функціонування мікроенергетичної системи з ВДЕ	67
3.5 Моделювання роботи мікроенергетичної системи з ВДЕ та оптимізацією використання системи накопичення енергії	73
3.6 Порівняння результатів моделювання режимів роботи мікроенергетичної системи	86
Висновки до третього розділу.....	88
РОЗДІЛ 4 ОХОРОНА ПРАЦІ	89
4.1 Дотримання заходів безпеки в процесі монтажу електроустановок мікроенергетичних систем.....	89
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ.....	91
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ.....	93

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ

PV – фотоелектрична установка

АСНЕ – акумуляторні системи накопичення енергії

ВДЕ – відновлювані джерела енергії

МНЕ – маховикові накопичувачі енергії

НМНЕ – надпровідні магнітні накопичувачі енергії

ПЕ – паливні елементи

ПРАЕ – проточні акумулятори електроенергії

СНЕ – система накопичення енергії

СНЕСП – системи накопичення енергії стисненого повітря

СНТЕ – системи накопичення теплової енергії

ВСТУП

Актуальність теми. Сучасна тенденція впровадження розподілених генеруючих комплексів слугує потужним імпульсом трансформації традиційних електричних мереж у динамічні та адаптивні структури, що висуває нові виклики щодо керування їхніми робочими режимами. Еволюція електроенергетичної галузі в напрямку децентралізованого забезпечення споживачів електроживленням спричинила розвиток інноваційної концепції активних електромереж з розосередженою генерацією, внаслідок чого постали мікроенергетичні системи як високоінтелектуальні та автоматизовані комплекси електропостачання.

Мікроенергетична система являє собою інноваційну технологічну розробку, спроможну оптимізувати процеси генерації електричної енергії та забезпечити економічну ефективність для споживачів. Інтелектуальні механізми управління енергетичними потоками слугують критично важливими компонентами, що дозволяють досягати стратегічних цілей децентралізованих електромереж.

З технічної погляду мікроенергетична система є низьковольтною електророзподільчою інфраструктурою, яка під'єднується до електромережі через спільний комутаційний вузол. Структура мікроенергетичної системи формується сукупністю різнотипних елементів, до яких входять контрольовані та автономні джерела розосередженої електрогенерації, акумулюючі енергетичні комплекси та регульовані електроспоживачі. Специфічні властивості та динамічна поведінка складників мікроенергетичної системи становлять складне технологічне завдання з погляду адміністрування мережевих процесів та її експлуатаційного супроводження, що вимагає розроблення інноваційних та вдосконалення існуючих стратегій керування.

Залежно від параметрів та питомої ваги розосереджених генеруючих джерел і накопичувальних електроенергетичних комплексів у конкретній

мікроенергетичній системі, необхідна архітектура керування енергетичними потоками може суттєво відрізнитися від традиційної електромережевої конфігурації. Типова мікроенергетична система здатна функціонувати у двох операційних режимах: паралельної роботи з електромережею та в ізолюваному режимі, коли система повністю автономізується від централізованої мережі під час аварійного знеструмлення. В автономному стані мікроенергетична система продовжує забезпечувати електроживлення, діючи як самодостатня ізолювана електрична інфраструктура.

При автономній роботі мікроенергетичної системи постає критична необхідність використання накопичувальних енергетичних комплексів керування режимами їх роботи (розряд-заряд) з максимальною ефективністю. Тому питання розробки та аналізу роботи таких систем є актуальним.

Мета і задачі дослідження. *Метою роботи* є комплексне вивчення інноваційних підходів до управління процесами енергозбереження та моніторингу стану акумуляторних батарей з урахуванням специфічних вимог навантажувальних режимів у мікроенергетичній системі.

Для досягнення поставленої мети потрібно вирішити наступні задачі:

- 1) Здійснити аналіз мікроенергетичних системи із системами накопичення енергії.
- 2) Розглянути математичний апарат для моделювання роботи елементів мікроенергетичної системи із системою накопичення енергії.
- 3) Провести моделювання та аналіз роботи мікроенергетичної системи із системою накопичення електроенергії.
- 4) Розробити заходи з охорони праці та безпеки в процесі монтажу електроустановок мікроенергетичних систем.

Об'єкт дослідження – режими функціонування мікроенергетичної системи з системою накопичення електричної енергії.

Предмет дослідження – вплив стану системи накопичення електроенергії в складі мікроенергетичної системи на процес її роботи.

Методи дослідження. Під час виконання досліджень були застосовані метод теорії електричних кіл, методи математичного моделювання, методи математичної оптимізації за умови накладення обмежень.

Наукова цінність роботи полягає в подальшому розвитку та удосконаленні алгоритмів дослідження систем автоматичного керування роботою мікроенергетичних систем із системами накопичення електроенергії.

Практична цінність роботи полягає в тому, що розроблені в роботі моделі можуть бути використані під час розроблення, аналізу та впровадження мікроенергетичних систем з використанням відновлюваних енергоресурсів.

Структура роботи: кваліфікаційна робота складається із вступу, чотирьох розділів, загальних висновків, переліку посилань. Повний обсяг роботи складає 95 сторінок. Основна частина викладена на 84 сторінках друкованого тексту, містить 33 рисунків та 2 таблиці. Список використаних джерел містить 25 джерела та викладений на 3 сторінках.

РОЗДІЛ 1

МІКРОЕНЕРГЕТИЧНІ СИСТЕМИ ЯК ІННОВАЦІЙНИЙ ПІДХІД ДО ДЕЦЕНТРАЛІЗАЦІЇ ТА ОПТИМІЗАЦІЇ ЕНЕРГОМЕРЕЖ

1.1 Трансформація енергосистеми України: технічні рішення та адаптація в умовах воєнних дій

Війна в Україні поставила безпрецедентні виклики перед енергетичним сектором країни. Масовані ракетні атаки на об'єкти енергетичної інфраструктури призвели до суттєвих пошкоджень як генеруючих потужностей, так і системоутворюючих та розподільчих мереж. Це створило ситуацію, коли для збереження цілісності енергосистеми довелося запроваджувати графіки відключень споживачів, щоб збалансувати доступні потужності з критичним навантаженням. Особливо гострою стала проблема забезпечення електроенергією критичної інфраструктури – лікарень, водоканалів, об'єктів життєзабезпечення міст. Це потребувало термінового встановлення автономних джерел живлення та створення резервних схем електропостачання таких споживачів.

Через пошкодження магістральних ліній електропередачі окремі частини енергосистеми були змушені перейти на ізолювану роботу. Це створило додаткові технічні складнощі, оскільки в кожному такому «енергетичному острові» необхідно було забезпечити власний баланс генерації та споживання, підтримувати стабільність частоти. Виникла гостра потреба в локальних балансуючих потужностях та їх системах управління.

Для підвищення надійності електропостачання розпочалася активна децентралізація генерації – розвиток розподілених джерел енергії, що дозволяють зменшити залежність від великих електростанцій та магістральних мереж. Паралельно впроваджуються системи автоматичного

відновлення електропостачання та посилювався фізичний захист енергетичних об'єктів.

Посталі виклики часу свідчать що необхідно і далі продовжувати розвивати енергетику в напрямку підвищення її стійкості, маневреності та життєздатності. Одним із напрямків цього є розробка підходів до функціонування енергетичного сектору з урахуванням підходу мікроенергетичних мереж із використанням систем акумулювання енергії.

1.2 Мікроенергетичні системи як інструмент модернізації розподільчих мереж

Інтеграція ВДЕ створює принципово нові виклики для електроенергетичних систем. Специфіка роботи ВДЕ, що характеризується мінімальними граничними витратами, зумовлює їх пріоритетне використання на максимально доступній потужності. Ключова технічна проблема полягає у стохастичному характері генерації ВДЕ. На відміну від традиційних електростанцій, потужність яких можна регулювати за командами диспетчера, обсяг генерації сонячних та вітрових установок залежить від природних факторів – інтенсивності сонячного випромінювання та швидкості вітру.

Для системних операторів це створює складне завдання з балансування енергосистеми в режимі реального часу. Необхідність щосекундної синхронізації попиту та пропозиції електроенергії вимагає впровадження систем прогнозування генерації ВДЕ; швидкодіючих резервних потужностей, засобів акумулювання енергії, технологій керування попитом, інтелектуальних систем управління мережею. Такий комплексний підхід дозволяє забезпечити надійне функціонування енергосистеми при зростаючій частці відновлюваної генерації.

Зростання частки ВДЕ в енергобалансі створює феномен надлишкової генерації, коли доступна потужність перевищує поточний попит. Без

впровадження гнучких технологій це призводить до необхідності обмеження виробництва «зеленої» електроенергії, що знижує економічну ефективність.

Системи накопичення енергії виступають ключовим елементом забезпечення гнучкості електромережі, виконуючи функції акумулювання надлишкової генерації, покриття пікових навантажень, балансування енергосистеми, резервування потужності; стабілізації параметрів мережі.

У відповідь на ці виклики розвинулась концепція мікроенергетичних систем – локальних енергетичних кластерів, що об'єднують розподілені генератори різних типів, системи накопичення енергії; керовані навантаження, інтелектуальні системи управління, засоби моніторингу та захисту.

В якості ключових переваг мікроенергетичних систем слід відзначити оптимізацію використання ВДЕ, підвищення надійності електропостачання, забезпечення якості електроенергії, можливість автономної роботи, зниження втрат при передачі енергії; гнучке керування попитом та генерацією.

Така архітектура дозволяє енергосистемі розглядати мікроенергетичні системи як єдиний керований елемент, що може працювати як в режимі споживача, так і джерела енергії, забезпечуючи стабільне живлення критичних споживачів та ефективну інтеграцію розподіленої генерації.

Функціонування мікроенергетичних систем реалізується через два фундаментальних режими роботи, кожен з яких має свої особливості та призначення. У синхронному режимі система працює паралельно з основною електромережею, забезпечуючи двонаправлений обмін енергією. Це дозволяє мікроенергетичній системі брати активну участь у балансуванні енергосистеми та наданні системних послуг. Економічна ефективність досягається через можливість продажу надлишкової енергії в мережу, закупівлі електроенергії в періоди низьких цін, а також участі в регулюванні частоти та наданні резервної потужності.

При виникненні аварійних ситуацій в основній мережі, погіршенні якості електроенергії, планових відключеннях чи загрозах кібербезпеці, мікроенергетична система переходить в острівний режим роботи. У цьому

стані система забезпечує автономне електропостачання споживачів, підтримуючи необхідні параметри якості електроенергії та виконуючи всі контрактні зобов'язання. Критично важливим аспектом стає точне балансування генерації та споживання в межах ізольованої системи.

Керування мікроенергетичними системами здійснюється через складну систему автоматичного перемикання режимів роботи з використанням адаптивних алгоритмів регулювання напруги. Особлива увага приділяється підтримці частоти в острівному режимі та процесу синхронізації при відновленні мережевого режиму. Оптимізація розподілу навантаження між різними джерелами енергії забезпечує максимальну ефективність роботи системи. Така гнучка архітектура мікроенергетичної системи, що поєднує можливості автономної та синхронної роботи, суттєво підвищує надійність електропостачання та забезпечує ефективне використання розподілених енергетичних ресурсів у сучасних умовах трансформації енергетичних систем.

Стимулювання розвитку відновлюваної енергетики через механізм «зеленого» тарифу створило потужний імпульс для впровадження мікроенергетичних систем у приватному секторі. Значимість цього тренду визначається комплексним впливом на енергетичну галузь та суспільство в цілому. Особливо актуальність помітна тепер під час військових дій на території України та постійних дефіцитах електроенергії.

Насамперед мікроенергетичні системи пропонують вирішення проблеми енергетичної сталості, забезпечуючи надійне живлення критичних споживачів під час аварій в основній мережі. Така архітектура створює численні переваги як для споживачів, так і для комунальних підприємств: підвищується загальна енергоефективність, мінімізується споживання ресурсів, знижується екологічне навантаження, покращується якість електропостачання. На рівні мережевої інфраструктури спостерігається зменшення втрат, усунення перевантажень та покращення контролю напруги.

В рамках концепції «розумних мереж» мікроенергетичні системи представляють інноваційну архітектуру розподільчих мереж, що максимально

використовує потенціал малої розподіленої генерації в низьковольтних системах. Окрім забезпечення резервного живлення, такі системи сприяють оптимізації витрат та інтеграції локальних енергоресурсів, які складно використовувати в традиційній мережі.

Державна політика різних країн стимулює впровадження розподілених енергоресурсів для зменшення екологічного впливу, оптимізації витрат та підвищення надійності системи. Стрімкий розвиток інформаційних технологій сприяє появі децентралізованих моделей управління енергоресурсами – від мікроенергетичних систем до віртуальних електростанцій та нових сервісів, включаючи об'єднання енергоресурсів та електромобільні парки.

1.3 Види мікроенергетичних систем, їх особливості та технології застосування

Мікроенергетичні системи можна розподілити на різні категорії, враховуючи численні характеристики: масштаб охоплення, специфіку генерації, географічне розташування та особливості інфраструктури. Кожен тип має свої унікальні властивості та сферу застосування.

Особливе місце займають **локальні мікроенергетичні системи**, які охоплюють обмежені території підприємств, закладів або організацій. Їх перевага полягає в інтеграції розподілених генерацій з різними споживачами електроенергії в межах компактної території. Така концентрація дозволяє власнику ефективно здійснювати моніторинг, контроль та оптимізацію енергетичних потоків. Локальні мікроенергетичні системи часто включають комбінацію традиційних та відновлюваних джерел енергії, системи накопичення енергії, а також розумні системи управління навантаженням. Це забезпечує високу енергетичну автономність, надійність постачання та можливість оперативного реагування на зміни в енергоспоживанні.

Мікроенергетичні системи муніципального рівня призначені для забезпечення енергією тисяч споживачів. Унікальність цієї моделі полягає в

тому, що окремі об'єкти, забезпечені власними генерувальними потужностями, можуть передати надлишок енергії сусіднім об'єктам у межах енергетичної спільноти. Такі системи часто включають централізовані або розподілені накопичувачі енергії, що забезпечує гнучкість та надійність енергопостачання.

Автономні мікроенергетичні систем постійно функціонують в острівному режимі через географічну віддаленість або економічні фактори. Ці системи розгортаються в регіонах, де відсутня традиційна електрична інфраструктура – у гірській місцевості, островах, віддалених населених пунктах. Дослідження засвідчують економічну доцільність впровадження таких систем, особливо при використанні відновлюваних джерел енергії, що суттєво знижує загальну вартість генерації життєвого циклу проекту. Для масштабних віддалених територій характерне створення кластеру незалежних мікроенергетичних систем, кожна з яких має власного оператора. Така структура забезпечує оптимальне управління, надійність енергопостачання та дозволяє ефективно розподіляти навантаження між окремими системами.

Мікроенергетичні системи, хоча й зазвичай проектуються як автономні та енергонезалежні, можуть зазнавати небажаних змін у роботі через коливання нестабільних відновлюваних джерел енергії. Раптові та різкі зміни в генерації можуть викликати або дефіцит, або надлишок електроенергії, що створює ризик відхилень частоти та напруги. Для стабілізації цих параметрів можна на короткий час підключати мікроенергетичні системи до сусідньої мережі, що дозволить обмінюватися енергією та знижувати коливання частоти й напруги до прийнятних рівнів.

Мікроенергетичні системи військового призначення розгортаються з особливим акцентом на забезпеченні як фізичної, так і кібербезпеки військових об'єктів. Вони створені для гарантованого постачання електроенергією військових об'єктів і мінімізує залежність від енергосистеми.

Комерційні та промислові мікроенергетичні системи стрімко розвиваються за кордоном, особливо в Північній Америці та країнах

Азіатсько-Тихоокеанського регіону. Головною мотивацією для впровадження промислових мікроенергетичних систем є підвищення безпеки та надійності енергопостачання. В багатьох виробничих процесах будь-яке відключення електроенергії може призвести до значних фінансових втрат і витрат часу на перезапуск обладнання.

Зважаючи на перспективне значення мікроенергетичних систем у сучасному енергетичному секторі, науковці та інженери активно спрямовують свої зусилля на дослідження та науковий пошук в наступних напрямках.

Системи контролю. Управління є ключовим елементом мікромережевої інфраструктури, оскільки саме ці системи контролюють роботу всіх компонентів мікроенергетичних систем на основі зібраних даних. Різні системи управління розробляються відповідно до пропускної здатності, розподілу навантаження, динамічної реакції та рівня складності конкретної мережі. У цій сфері реалізовано чимало методів, починаючи від систем диспетчерського управління і збору даних (SCADA), які взаємодіють з локальними контролерами, до комплексних одиниць управління, призначених для невеликих мікроенергетичних систем (наномереж).

Системи зберігання енергії. Завдяки високій швидкості динамічної реакції системи зберігання енергії мають важливе значення для підтримки балансу між попитом та пропозицією в мікроенергетичних системах. Ця галузь стрімко розвивається, і зараз доступний широкий вибір систем для різних масштабів систем та їх експлуатаційних потреб. До них належать гідроакumuлюючі системи, накопичувачі стисненого повітря, маховики, різноманітні електрохімічні акумулятори, проточні акумулятори, надпровідні магнітні накопичувачі, суперконденсатори, а також енергетичні накопичувачі на основі технологій хімічного перетворення газу.

Системи перетворення енергії. Технології перетворення енергії розвиваються значними темпами, зокрема завдяки прогресу в галузі напівпровідникових матеріалів, що сприяє зниженню їхньої вартості та підвищенню ефективності. Застосування вискоефективної силової

електроніки стає основою для генерації, передачі, розподілу та забезпечення кінцевих споживачів енергією, що покращує надійність мікроенергетичних систем і знижує витрати на енергопостачання.

Поєднання із сучасними засобами управління може відкрити нові можливості для використання відновлюваних джерел енергії. Зокрема, нещодавно представлена концепція віртуальних синхронних машин стала перспективним методом для збільшення віртуальної інерції в енергосистемі шляхом керування електронними перетворювачами потужності. Це дозволяє покращити стабільність системи та полегшити інтеграцію відновлюваних ресурсів електроенергії та їх конектинг з мережею.

Питання якості електроенергії, як то коливання і відхилення напруги, гармонійні спотворення, можуть обмежувати широке впровадження мікроенергетичних систем. Оскільки інтерфейсні перетворювачі мають набагато ширшу смугу регулювання, ніж звичайні синхронні генератори, вони здатні активно контролювати якість електроенергії в розподільчій мережі без необхідності використання додаткових фільтруючих пристроїв від гармонік.

Мікроенергетичні системи на основі постійного струму. Порівняно з традиційними системами змінного струму, мікроенергетичні системи з використанням постійного струму забезпечують значно вищу ефективність, оскільки не вимагають перетворення струму за умови живлення споживачів постійного струму. Такий підхід дозволяє підвищити ефективність до 80%, що суттєво перевищує ефективність систем на змінному струмі яка рівна 60%.

Економічний аспект. З погляду економічної доцільності мікроенергетичні системи часто встановлюються групами споживачів, які прагнуть контролювати власне виробництво електроенергії. Оскільки тарифи на електроенергію від комунальних підприємств включають втрати, витрати на обслуговування, перевантаження мережі та інші додаткові збори й податки, кінцева вартість електроенергії є високою. Це робить самогенерацію електроенергії більш доступним та економічно вигіднішим варіантом, а мікроенергетичні системи – перспективною альтернативою.

1.4 Типологія, принципи функціонування та перспективи інтеграції в мікроенергетичні системи систем накопичення електроенергії

Безперервний розвиток технологій накопичення енергії має ключове значення для сучасних енергетичних систем. Системи накопичення електроенергії відрізняються за принципами роботи та характеристиками, що дозволяють класифікувати їх за такими основними типами, що описані нижче.

Гідроакumuлюючі електростанції є одним із найбільш розширених типів механічних систем накопичення електроенергії. Ключовою перевагою цієї технології є доступність та невичерпність водних ресурсів.

Наразі гідроакumuлюючі станції являють собою найбільш потужні накопичувачі, здатні зберегти енергію в обсягах від кількох десятків ГВт·год або сотень МВт. Принцип їх роботи полягає у використанні періодів низького попиту на електроенергію для pompування води з нижнього водосховища у верхнє. У період пікового попиту вода стікає з верхнього резервуару, обертаючи турбіни та генеруючи дефіцитну електроенергію. Такий підхід дозволяє акумулювати надлишкову базову генерацію та ефективно задовольняти пікові навантаження енергосистеми. Завдяки високій ємності, потужності та швидкості, гідроакumuлюючі електростанції розвивають вагомую роль у майбутньому зберіганні електроенергії.

Системи накопичення теплової енергії (СНТЕ) базуються на використанні матеріалів фазових переходів. Під час зарядження, сипкий накопичувач поглинає тепло, переходячи з твердого стану в рідкий (плавлення). Навпаки, при розрядженні він віддає тепло, повертаючись до твердої фази (кристалізація). Теплообмін між накопичувачем та зовнішнім середовищем відбувається за допомогою теплоносія. Ефективність такого зберігання енергії залежить від утримання температури в заданій частині – чим вище є температура, тим більше є концентрація енергії в системі.

Ключовою перевагою СНТЕ є можливість накопичення теплової енергії при постійній температурі, що покращує конструкцію та ефективність. Ці рішення знаходять широке застосування в теплоенергетичних установках, системах опалення та охолодження, а також в інтеграції з ВДЕ. Триває удосконалення матеріалів та технологій накопичення теплової енергії, розширюючи сферу їх використання в сучасних енергетичних системах.

Системи накопичення енергії стисненого повітря (СНЕСП) представляють собою один із різновидів механічних накопичувачів. Дія їх заснована на розділенні в часі процесів стиснення повітря та його розширення для генерації електроенергії. Традиційно газові турбіни виробляють близько двох третин енергії на стиснення повітря, необхідного для горіння палива. Технологія СНЕСП дозволяє використовувати електроенергію в нічні години (період накопичення) для стиснення повітря, а потім у пікові навантаження (період розрядки) направляти стиснене повітря на розширення в турбінах. Таким чином при тому самому споживанні палива СНЕСП-станція здатна виробляти в 3 рази більше електроенергії, ніж звичайна газова турбіна. Це значно підвищує ефективність та гнучкість використання ресурсів.

Ключовими перевагами СНЕСП є висока питома потужність, тривале зберігання енергії та можливість використання в пікові періоди. Завдяки цим характеристикам їх широко застосовують для вирівнювання нерівномірностей в енергосистемах з великою часткою відновлюваних джерел.

Концепція об'єднання підземного зберігання природного газу та накопичення електроенергії є перспективним підходом до інтегрованого енергозбереження. Ключова ідея полягає у використанні різниці тисків між газом високого тиску (до 200 бар), що зберігається в підземних сховищах на глибині близько 1500 метрів, та газом низького тиску (60-80 бар) в магістральних газопроводах. Під час закачування газу у сховища частина енергії витрачається на його стиснення. Цю енергію можна було компенсувати за рахунок генерації електроенергії при декомпресії газу під час його відбору зі сховища для транспортування мережею.

Таке інтегроване рішення дозволяє акумулювати енергію у двох формах – газоподібній (у вигляді стисненого природного газу) та електричній, забезпечуючи гнучке та ефективне її використання. При цьому, підземні сховища природного газу виступають потужними накопичувачами енергії великої ємності. Об'єднання газової та електричної інфраструктури відкриває нові можливості для оптимізації енергетичних систем, підвищення їх стійкості та адаптивності до мінливих умов навантаження.

Проточні акумулятори електроенергії (ПРАЕ) представляють собою особливий тип електрохімічних накопичувачів електроенергії. На відміну від традиційних твердотільних акумуляторів, у ПРАЕ електрохімічно активні речовини зберігаються в вигляді водних або неводних електролітних розчинах.

Принцип роботи ПРАЕ обґрунтовується на зворотних окислювально-відновних реакціях, що відбуваються на двох електродах, розділених мембраною. В процесі заряду-розряду електроліти прокачуються через електрохімічні осередки, забезпечуючи обмін іонами між електродами. Основною перевагою ПРАЕ є можливість незалежного масштабування потужності (визначається розмірами комірок) та ємності (об'ємом резервуарів для зберігання електролітів). Це дозволяє створити масштабні накопичувачі енергії – від кількох кіловат*годин до сотень мегават*годин. Розробляються різноманітні електролітні системи, такі як цинк-бромні, натрій-бромні, ванадієві, натрій-полісульфідні тощо, щоб розширити функціональні можливості та сферу застосування проточних акумуляторів.

Паливні елементи (ПЕ), що працюють на воді, являють собою ще один перспективний тип накопичувачів енергії. Ця технологія дозволяє зберігати енергію у вигляді води, яка може бути пізніше використана для генерації електрики. Ключові компоненти та функції такої системи зберігання енергії є: електролізер води – споживає електроенергію для розкладання молекул води на воду та кисень; водневий резервуар – накопичує вироблений водень для подальшого використання; паливний елемент – використовує воду та кисень з повітря для генерації електрики в період пікового попиту. Принцип роботи

паливного елемента обґрунтовується на простій окисно-відновній реакції водню та кисню, що відбувається в електрохімічному середовищі з двома електродами, розділеними електролітом. Цей процес є зворотним до електролізу, дозволяючи перетворювати хімічну енергію води на електричну.

Така інтегрована система накопичення енергії дає змогу ефективно використовувати надлишки електрогенерації для виробництва та зберігання водню, а потім відновлювати електроенергію в періоди високого попиту.

Хімічні акумулятори є ще одним способом накопичення та вивільнення електроенергії. Ці системи забезпечують подвійну функцію – перетворення хімічної енергії на електричну в процесі розрядки та навпаки – електричної на хімічну при зарядці. Електрохімічні реакції, що лежать в основі роботи акумуляторів, дозволяють зберегти енергію без шкідливих викидів чи значного шуму, а також потребують складного технічного обслуговування.

Є широкий спектр технологій, які використовують у виробництві акумуляторів. Кожен тип акумуляторів має свої особливості та характеристики – ємність, потужність, тривалість циклів заряду-розряду, безпеку, вартість тощо. Однією з основних проблем традиційних акумуляторних технологій є низька довговічність при великій кількості циклічних навантажень – зазвичай від 100 до 1000 циклів. Інженери постійно вдосконалюють матеріали та конструкції акумуляторів для їх надійності, безпеки та ефективності. Це дозволяє розширити сферу застосування хімічних накопичувачів енергії в сучасних енергетичних системах.

Маховикові накопичувачі енергії (МНЕ) являють собою ще один вид механічних систем акумуляування електроенергії. Вони складаються з масивного маховика, який приводиться в обертальний рух за допомогою електричного мотор-генератора. Ключовою особливістю МНЕ є те, що енергія зберігається у вигляді кінетичної енергії обертового маховика. Для зменшення втрат на тертя, маховик встановлюється в корпус, де підтримується дуже низький тиск, а сам він кріпиться за допомогою магнітних або механічних підшипників. Маховикові накопичувачі відзначаються надзвичайно великим

ресурсом – вони здатні витримувати від десятків до сотень тисяч циклів заряд-розряд. Це обумовлено високою механічною надійністю конструкції.

Основні переваги МНЕ – швидкість реакції, великий ресурс, екологічність та низькі експлуатаційні витрати. Вони знаходять застосування для вирівнювання короточасних коливань потужності, забезпечення аварійного живлення, а також у системах з високою частотністю циклування. Інженери постійно працюють над підвищенням щільності накопичення енергії та зменшенням втрат у маховикових накопичувачах для розширення сфер їх практичного використання в енергетичних мережах.

Надпровідні магнітні накопичувачі енергії (НМНЕ) використовують явище надпровідності для акумулювання електроенергії у вигляді магнітного поля. Вони складаються з котушки, виготовленої з надпровідного кабелю, зазвичай на основі ніобій-титану (NbTi), що працює за надзвичайно низьких температур. Під час заряджання, в котушці наводиться постійний струм, а при розрядці – цей струм зменшується, генеруючи електроенергію. Перед використанням, отриману енергію потрібно перетворити з постійного в змінний струм.

Суперконденсатори, або ультраконденсатори, поєднують в собі характеристики традиційних конденсаторів та електрохімічних акумуляторів. Вони накопичують енергію у вигляді електричного поля, розділеними іонопровідним електролітом. На відміну від акумуляторів, в суперконденсаторах не відбувається жодних хімічних реакцій, що значно підвищує їх циклічну стійкість. Зазвичай вони мають дуже високу потужність, ефективність близько 95% та тривалий строк експлуатації (8-10 років), але порівняно невелику питому енергію. Тому вони краще підходять для накопичення енергії на короткі періоди.

Технології НМНЕ та суперконденсатори становлять інтерес для застосування в енергетичних системах завдяки швидкодії, високій ефективності та тривалому ресурсу. Інженери продовжують вдосконалювати їх конструкції та характеристики для розширення сфер використання.

Фотоелектрична енергія може бути інтегрована в енергосистему разом із системами накопичення енергії СНЕ: фотоенергія є змінною і не завжди відповідає поточному рівню навантаження; коли генерація перевищує навантаження, надлишок енергії подається в загальну мережу; коли навантаження перевищує фотогенерацію, додаткова енергія надходить з мережі або з СНЕ; якщо мережа вимкнена, а фотоенергії недостатньо, СНЕ забезпечує живлення цільового навантаження. Це ілюструє важливість інтеграції систем накопичення енергії для підвищення ефективності використання фотоелектричних станцій та надійності енергопостачання, особливо коли навантаження знаходиться на значній відстані від фотоелектричної установки. Тому необхідний комплексний підхід до управління розподіленою генерацією та споживанням для забезпечення балансу в енергосистемі. Системи накопичення енергії відіграють ключову роль у цьому процесі.

Розглянемо конкретну ситуацію, яка ілюструє типову ситуацію, коли фотоелектрична генерація знаходиться віддалено від споживача. Побутове навантаження трансформатора становить 250 кВА, цільове навантаження розташоване приблизно за 5 км від фотоелектричної установки (PV) через лінію середньої напруги. Така схема приведена на рис. 1.1.

Такі умови створюють додаткові технічні виклики, які потребують впровадження систем накопичення енергії СНЕ: необхідність балансування змінної фотоелектричної генерації з навантаженням, розташованим на відстані; компенсація втрат в лінії електропередачі середньої напруги довжиною 5 км; забезпечення надійного живлення цільового навантаження у випадку вимкнення загальної мережі. Наявність детальних даних про функціонування фотоелектричної станції є ключовою умовою для аналізу сценаріїв її модифікації. Завдяки системі моніторингу «зеленої» енергетики, вся необхідна інформація акумулюється на сервері протягом цілого року.

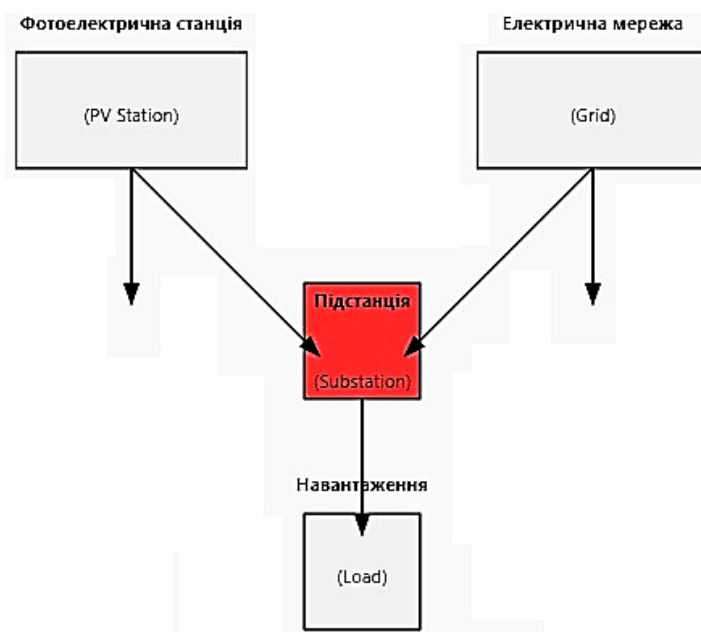


Рисунок 1.1 – З’єднання мікроенергетичної системи та розподільчої мережі

Грунтуючись на цих даних запропоновано розглянути варіант трансформації фотоелектричної станції, а саме – перехід від звичайної мережевої конфігурації до архітектури мікроенергетичної системи. Ключовим завданням є забезпечення надійного енергопостачання цільового навантаження цілодобово на рік. Передбачається наявність інтелектуальної системи управління. Контролер автоматично керуватиме роботою фотоелектричної установки (PV), системи накопичення енергії (СНЕ), споживчого навантаження (LOAD) та взаємодією з електричною мережею (GRID), як зображено на схемі (рис. 1.2).

Важливо змоделювати оптимальний варіант модифікації, який дозволить найбільш ефективно та надійно задовольнити потреби цільового споживача енергії. Такий комплексний підхід надасть змогу всебічно оцінити переваги переходу до архітектури мікроенергетичної системи.

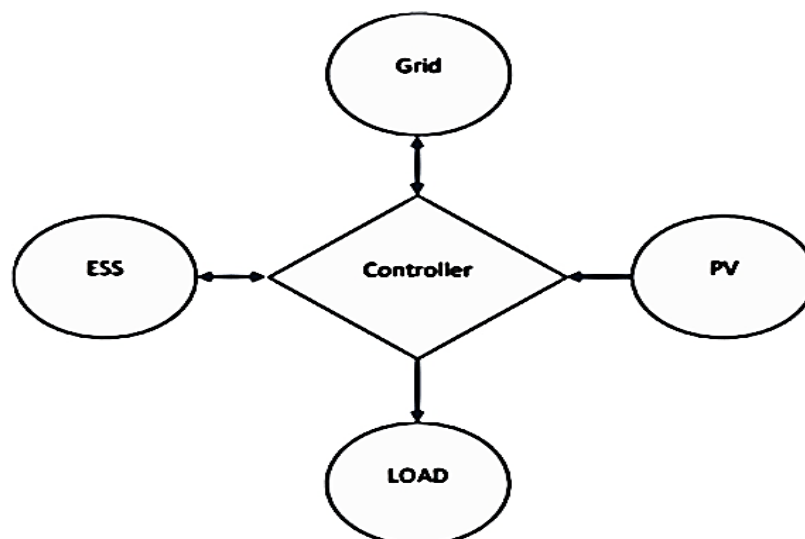


Рисунок 1.2 – Структура з мікроенергетичною системою

Реконструкція діючої фотоелектричної установки передбачає її структурне розділення на два функціональні блоки – традиційну мережеву частину та автономний сегмент мікроенергетичної системи, що використовують аналогічні сонячні панелі. Модернізація включає впровадження накопичувальної енергетичної системи, керованої головним контролером, який взаємодіє з комутаційною апаратурою з напругою середнього рівня. Ключовим технічним рішенням є заміна п'яти стандартних мережевих перетворювачів на спеціалізовані інвертори. У режимі нормального електропостачання об'єкт функціонує як звичайна мережева електростанція. При аварійному відключенні зовнішнього живлення система управління виконує такі операції:

- деактивує силові автоматичні вимикачі високовольтного сегменту;
- розмикає комутаційні пристрої змінного струму, пов'язані з інверторним обладнанням;
- переводить навантаження на автономні перетворювачі мікроенергетичної системи.

Комплексна схема модифікованої енергетичної системи відображена на рис. 1.3, демонструючи всі функціональні зв'язки між компонентами.

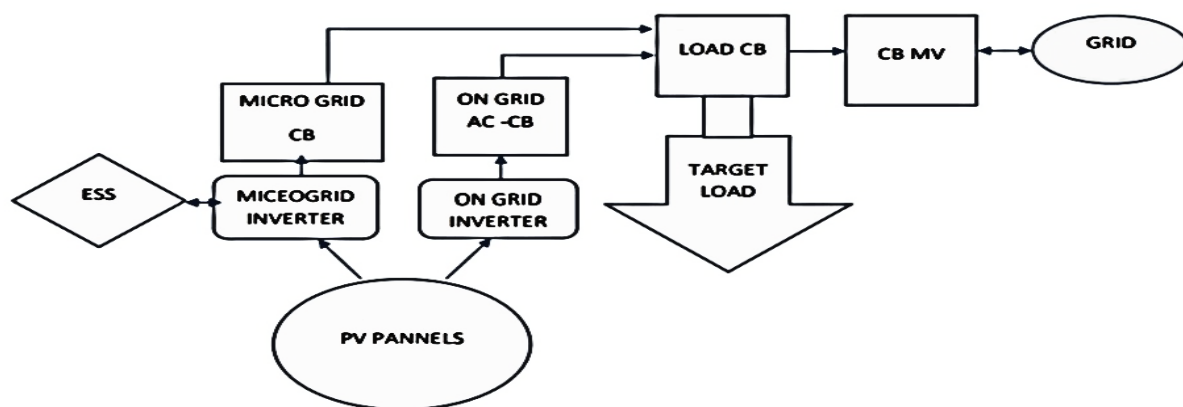


Рисунок 1.3 – Ілюстрація підходу до побудови мікроенергетичної ситеми

Система накопичення енергії має значні витрати, тому використання її потужності для живлення навантаження є недоцільним. Більш оптимальним варіантом є живлення навантаження від фотоелектричної системи, а використання системи накопичення лише для залишкових потреб. Заміна 5 інверторів з максимальним рівнем пікової потужності 300 кВт та керування лише комутаційними апаратами змінного струму є найкращим рішенням, тому розглянутий підхід є єдиним ефективним. Моделювання даних буде виконане за допомогою програмного інструменту Simulink Matlab для моделювання контролера.

1.6 Аналіз алгоритмів розрахунку електроенергетичного балансу в системах з відновлюваними джерелами живлення

В системі функціонують три змінні входні фактори, які впливають на її роботу: попит на енергію, потужність фотоелектричної установки та потужність електричної мережі. Попит на електроенергію може як зростати, так і знижуватися в залежності від різних умов. Основними факторами, що впливають на коливання попиту, є час доби, сезонність, святкові дні. Так у вечірній час або в холодний сезон споживання електроенергії, як правило, збільшується, тоді як у святкові періоди, навпаки, попит може знижуватись.

Потужність, що виробляється фотоелектричною системою PV, також змінюється під впливом зовнішніх умов. Одним із ключових факторів є погода, яка може значно знижувати ефективність PV-установок у хмарні дні. Також на продуктивність панелей впливає рівень запиленості, яка зменшує доступ світла до фотоелементів, а крім цього – температура повітря та інтенсивність сонячного випромінювання.

Електрична мережа, в свою чергу, також є змінним фактором, який впливає на загальну систему. Іноді мікроенергетична система може бути відключена внаслідок планового технічного обслуговування або ремонту електростанцій та ліній середньої напруги. Несподівані поломки чи аварійні ситуації також можуть спричинити тимчасові перебої в подачі електроенергії.

В роботі був виконаний аналіз можливих режимів роботи та отримано чотири основні результати, що стосуються управління енергією в системі. Кожен із них детально описує логіку розрахунку необхідної або виробленої енергії в різних умовах роботи мережі, фотосистеми, акумуляторів.

А. Розрахунок енергопотреби імпорту з мережі. У випадку, коли попит та заряджання системи накопичення енергії перевищує потужність, яку можуть виробити фотоелектричні панелі, і мережа при цьому активна, обсяг електроенергії імпортований з мережі визначається:

$$P_{\text{IMPORT}} = P_{\text{LOAD}} - P_{\text{PV}} + P_{\text{CHE}}.$$

Це правило ставить пріоритет на заряджання батарей від фотоелектричних модулів, щоб мінімізувати потребу в енергії з мережі.

Якщо потужність PV-установок перевищує попит і мережа увімкнена, тоді кількість імпортованої електроенергії дорівнює нулю. Це означає, що всі потреби задовольняються власним виробництвом енергії.

У випадках, коли попит є меншим за потужність PV-установок або більшим за неї, але мережа не активна, також кількість імпортованої електроенергії дорівнює нулю.

В. Розрахунок відпущеної споживачу енергії. Коли попит перевищує потужність PV-установок і мережа зовнішня є доступна, продаж електроенергії нульовий, оскільки вся вироблена енергія використовується для покриття внутрішнього попиту. Якщо сумарний попит і потреби заряджання акумулятора є меншими за потужність, що виробляється PV-установкою, і мережа активна, то продана електроенергія розраховується як

$$P_{\text{EXPORT}} = P_{\text{PV}} - P_{\text{LOAD}} - P_{\text{CHE}}.$$

Це забезпечує пріоритетне заряджання акумуляторів від фотоелектричних батарей, а надлишки енергії можуть продаватися в мережу.

Якщо попит менший або більший за потужність PV-установок, а мережа неактивна, тоді кількість проданої електроенергії також дорівнює нулю, оскільки мережа недоступна для передачі енергії споживачам.

С. Розрахунок розряду системи накопичення енергії. У випадках, коли мережа вимкнена, а потужність PV-установок є нижчою за рівень попиту, обсяг розрядженої енергії становить

$$P_{\text{discharge}} = P_{\text{PV}} - P_{\text{LOAD}}.$$

Це означає, що для задоволення всього попиту на енергію використовується частина заряду акумулятора. Якщо мережа вимкнена, але потужність PV-установок перевищує попит, тоді розряджання акумулятора не відбувається, тобто кількість розрядженої енергії дорівнює нулю.

У випадку, коли мережа увімкнена і потужність PV-установок є більшою за попит, розряджання також не відбувається, оскільки попит повністю задовольняється за рахунок виробленої енергії від PV-установок.

4. Розрахунок заряду системи накопичення енергії. Якщо акумулятор частково або повністю розряджений, і при цьому мережа увімкнена, заряджання акумулятора відбувається з урахуванням розрядженої енергії. Це

забезпечує оптимальне використання доступної енергії для підтримки заряду акумулятора на необхідному рівні.

Для візуалізації зазначеної логіки приведена схема на рис. 1.6.

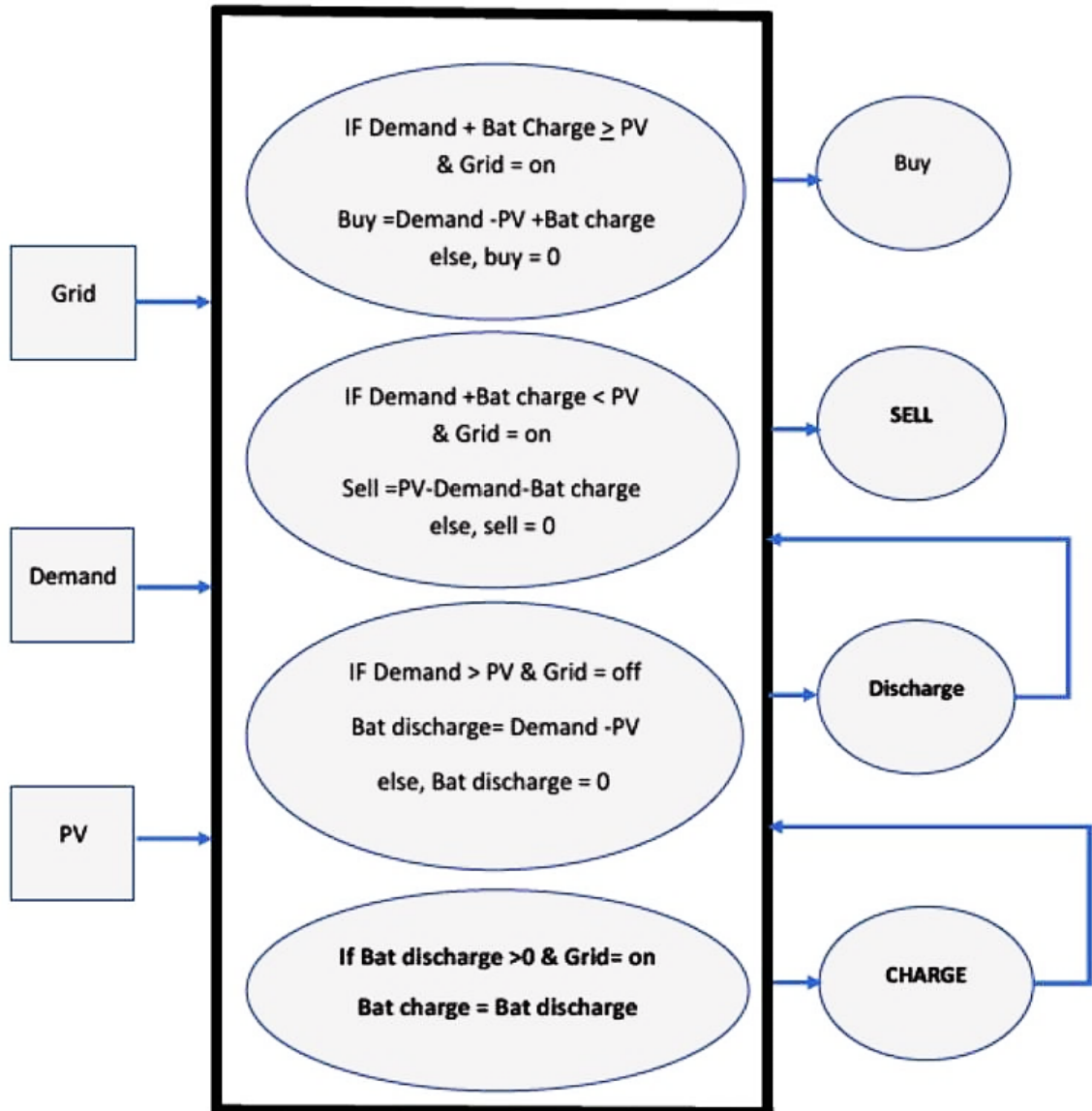


Рисунок 1.4 – Схема реалізації операторів керування

Висновки до першого розділу

У першому розділі було розглянуто концепцію мікроенергетичної системи, яка є перспективною технологією для розвитку сучасних та

майбутніх енергосистем. Популярність мікроенергетичних систем обумовлена їх здатністю інтегрувати розподілені джерела енергії, системи накопичення енергії та контрольовані навантаження, що робить її важливим елементом у процесі децентралізації енергетики. Проте, для повноцінної реалізації потенціалу мікроенергетичних мереж, необхідне ефективне управління режимами роботи та контроль енергетичних процесів у системі.

Однією з ключових задач при створенні мікроенергетичних систем є визначення і планування потужностей, що включає вибір підходящих систем зберігання енергії. Це дозволяє оцінити, чи зможе система забезпечити достатню кількість електроенергії для споживачів, а також протягом якого часу вона здатна працювати в автономному режимі.

Системи накопичення енергії відіграють важливу роль, оскільки вони зберігають надлишкову енергію, яка може бути використана в моменти, коли інші джерела енергії недоступні, економічно не вигідні або коли виникає несподівана потреба в додатковій потужності.

Розвиток концепції мікроенергетичних систем дозволив створити систему, яка являє собою кластер взаємопов'язаних розподілених генераторів, контрольованих навантажень та систем зберігання енергії. Цей кластер функціонує як єдина система, яку можна розглядати як кероване навантаження або джерело енергії з точки зору централізованої мережі.

Основна мета мікроенергетичних систем полягає у підвищенні рівня інтеграції розподілених генераторів у розподільчу мережу, зберігаючи при цьому якість енергопостачання та забезпечуючи надійне постачання енергії для критичних навантажень.

Особливо важливим аспектом є здатність мікроенергетичних систем працювати як у режимі підключення до центральної електромережі, так і в автономному режимі. Така гнучкість дозволяє адаптуватися до змінних умов, забезпечуючи безперервне постачання енергії навіть у разі відключення від основної мережі.

РОЗДІЛ 2

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ЕЛЕМЕНТІВ МІКРОЕНЕРГЕТИЧНОЇ СИСТЕМИ З СИСТЕМОЮ АКУМУЛЮВАННЯ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ

2.1 Методологія проектування та керування мережевою фотоелектричною системою з акумуляторним накопиченням енергії

Дослідження проведені в даній роботі пропонують економіко-технічну модель проектування мережевої PV-системи з акумуляторним сховищем енергії. В такій конфігурації основне енергозабезпечення здійснюється комплексом «сонячна станція – акумуляторна система накопичення», тоді як центральна електромережа виконує функцію резервного джерела живлення.

Основне завдання дослідження полягає у розробці комплексної системи проектування та керування фотоелектричною установкою з акумуляторним накопичувачем (PV-ACHE). Представлена аналітична модель дозволяє визначити оптимальні параметри потужності сонячних панелей та ємності акумуляторів для досягнення мінімальної нормованої вартості електроенергії.

Розроблена модель враховує погодинні показники енергоспоживання протягом базового року, корелюючи їх із даними сонячної радіації та температурними режимами локації встановлення. Практична апробація запропонованого підходу здійснювалася на прикладі проектування мережевої PV-ACHE системи для навчального закладу.

На рис. 2.1 відображено принципову схему мережевої PV-ACHE системи із зазначенням напрямків енергетичних потоків прийнятих за умовно додатні. Комплекс об'єднує фотоелектричні панелі та акумуляторні батареї, що доповнені необхідною системою електричних перетворювачів. До складу останньої входять контролер заряду та інвертор, а також компоненти підключення до електромережі та споживачів.

Важливим елементом системи є контролер заряду з вбудованим модулем відстеження точки максимальної потужності. Цей пристрій забезпечує оптимальний режим роботи акумуляторів, запобігаючи як надмірному заряду, так і критичному розряду батарей.

Інверторний блок DC/AC здійснює перетворення постійного струму, що генерується фотоелектричними модулями та системою накопичення енергії, у змінний струм відповідно до вимог споживачів.

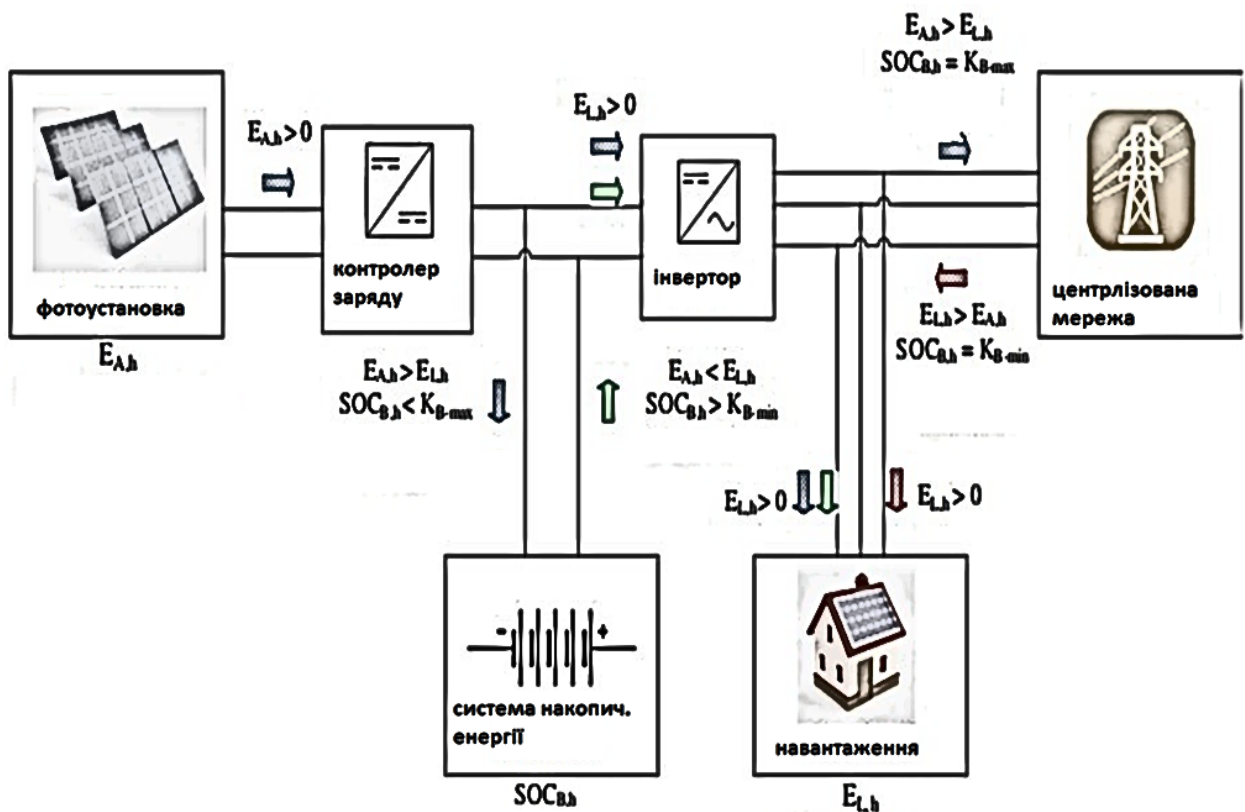


Рисунок 2.1 – Схема для під'єднаної системи PV-ACNE

Експлуатаційні межі акумуляторної системи визначаються рівнянням (2.1), яке застосовується для кожного часового інтервалу h . При цьому поточний рівень заряду акумулятора $\text{SOC}_{\text{В},h}$ повинен знаходитися в діапазоні між максимальною ємністю $K_{\text{В}}^{\text{max}}$ та мінімальним порогом $K_{\text{В}}^{\text{мін}}$. Нижня межа ємності розраховується через параметр максимально допустимої глибини розряду (DOD) згідно з рівнянням (2.2).

$$K_B^{min} \leq SOC_{B,h} \leq K_B^{max} \quad (2.1)$$

$$K_B^{min} = (1 - DOD) \times K_B^{max} \quad (2.2)$$

Головне призначення комплексу полягає в забезпеченні енергетичних потреб споживачів протягом кожної години за рахунок двох джерел: безпосередньої генерації фотоелектричними модулями або використання накопиченої в акумуляторах енергії. У випадках, коли потужності PV-АСНЕ системи недостатньо для повного покриття енергоспоживання, активується підключення до централізованої мережі, яка виконує функцію резервного джерела, що математично описується рівнянням (2.3).

$$E_{L,h} = E_{A,h} + E_{B,h} + E_{G,h} \quad (2.3)$$

Фотоелектричний комплекс першочергово спрямований на забезпечення поточних енергетичних потреб споживачів. При виникненні надлишку генерованої енергії вона послідовно розподіляється: спочатку на заряджання акумуляторної системи АСНЕ до її повної ємності, а залишок спрямовується на продаж до електромережі.

У періоди недостатньої сонячної радіації та вночі, коли виникає енергодефіцит, його компенсація здійснюється за рахунок накопиченої в АСНЕ енергії. Це відбувається доти, доки рівень заряду акумуляторів ($SOC_{B,h}$) не досягне мінімально допустимого значення. Після цього функцію енергозабезпечення бере на себе централізована мережа як гарантоване джерело живлення.

На рис. 2.2 представлено блок-схему, що відображає вищеописані алгоритми керування системою. Вона демонструє принципи розподілу

електроенергії між фотомодулями, накопичувачем, споживачами та мережею для кожного часового інтервалу h .

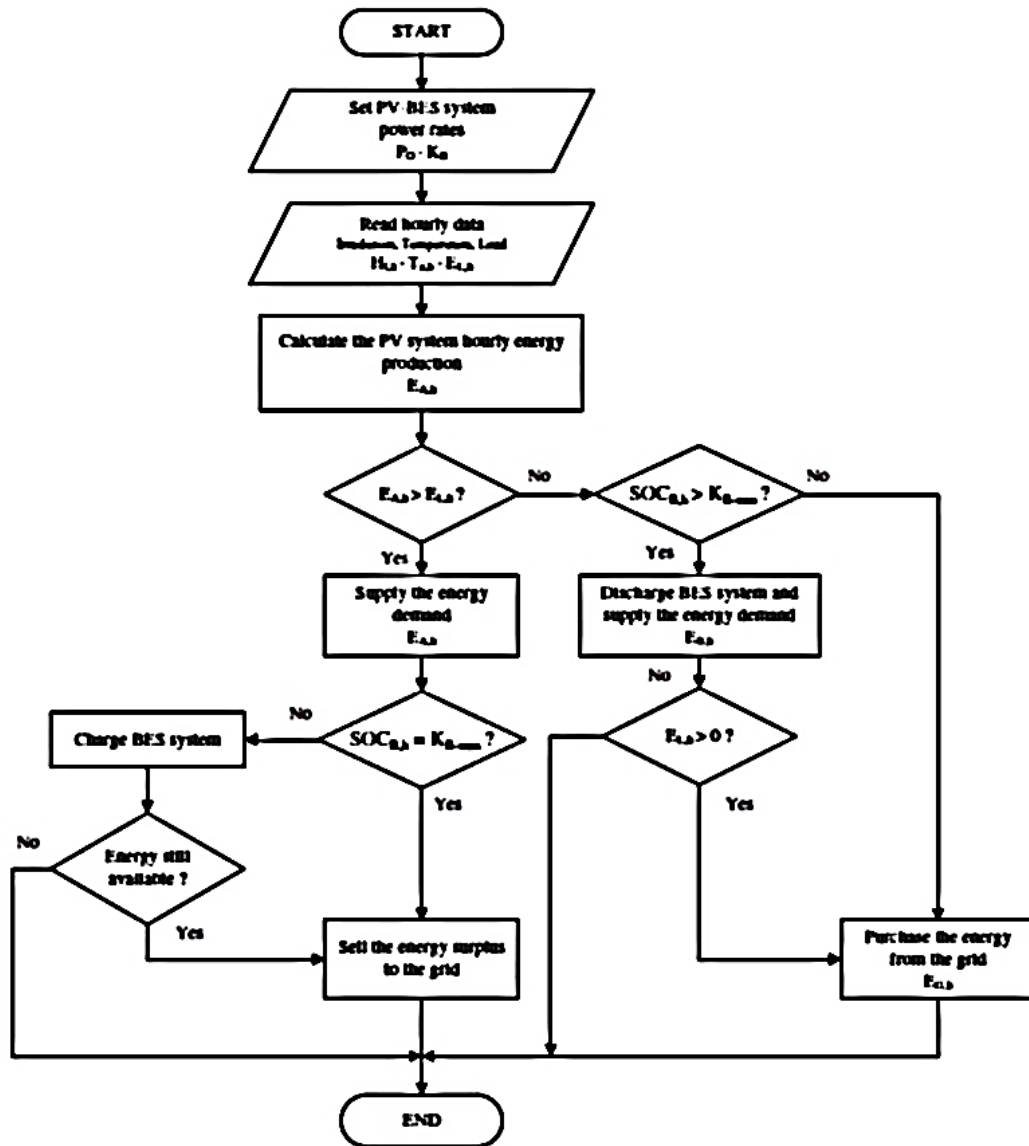


Рисунок 2.2 – Алгоритм розрахунку графіка перетоку електроенергії

Описаний алгоритм керування лежить в основі розробленої аналітичної моделі, яка симулює функціонування PV-ACNE системи впродовж базового року. Такий комплексний підхід до моделювання забезпечує можливість всебічної оцінки як енергетичної ефективності, так і економічних показників роботи інтегрованої фотоелектричної системи з накопичувачем.

2.2 Математична модель системи PV-ACNE

Наступним етапом необхідно дослідити дві взаємодоповнюючі моделі, які становлять методологічне підґрунтя для проектування та оцінки ефективності інтегрованих фотоелектричних систем з акумуляторним накопиченням енергії (PV-ACNE). Перша модель є аналітичною та спрямована на детальне моделювання процесів енергетичного балансу та функціонування системи. Друга модель має економічну природу та забезпечує комплексну оцінку фінансової ефективності проекту шляхом розрахунку нормованої вартості електроенергії та визначення економічних показників.

Розроблена методологія вирізняється своєю комплексністю та гнучкістю, що дозволяє адаптувати підхід до різноманітних умов експлуатації та специфіки енергетичних потреб конкретних споживачів. Принципова особливість запропонованого рішення полягає в максимальній деталізації та врахуванні широкого спектра факторів, які впливають на ефективність функціонування фотоелектричної системи.

Для практичної реалізації розроблених моделей було створено спеціалізований параметричний інструмент на базі середовища *Python*. Цей програмний продукт є потужним аналітичним інструментарієм, призначеним для глибокого дослідження характеристик та режимів роботи PV-ACNE. Програмне забезпечення базується на складному алгоритмі керування енергетичними потоками, який дає змогу виконувати багатоваріантний аналіз системи з високим ступенем деталізації.

Ключовою перевагою розробленого інструменту є можливість варіювання основних параметрів системи в заздалегідь визначених межах. Зокрема, дослідник має змогу гнучко маніпулювати двома критичними параметрами: потужністю фотоелектричного обладнання та ємністю накопичувача акумуляторної системи накопичення енергії (ACNE). Такий

підхід дозволяє здійснювати пошук оптимальної конфігурації інтегрованого комплексу, максимально адаптованої до конкретних умов експлуатації.

Механізм варіювання параметрів побудований на принципах системного аналізу та передбачає послідовне моделювання різних сценаріїв. Це дає змогу не лише визначити найбільш ефективну конфігурацію системи, але й зрозуміти взаємозв'язки між її основними компонентами, оцінити чутливість техніко-економічних показників до зміни вхідних параметрів.

Розроблений інструментарій забезпечує всебічний аналіз, включаючи:

- моделювання погодинних режимів генерації та споживання електроенергії;
- оцінку впливу кліматичних факторів на ефективність фотоелектричної системи;
- розрахунок економічних показників проекту;
- визначення оптимальної потужності обладнання;
- аналіз потенціалу системи акумуляторного накопичення.

2.3. Математична модель фотогенерації PV-установкою

Стосовно фотоелектричної складової, розроблена модель обчислює погодинну генерацію енергії панелями ($E_{A,h}$) за виразом рівняння (2.4). У розрахунках враховується поступове зниження продуктивності через природне старіння фотоелектромодулів.

$$E_{A,h} = H_{I,h} \times A_a \times \eta_{PV} \quad (2.4)$$

де $A_a = P_o / (\eta_{module}) \times H_{I,h}$ поверхнева площа фотосистеми; величина P_o відноситься до стандартних умовах дослідження, $H_{I,h}$ взято 1 кВт/м².

Ефективність фотоелектричної системи визначається декількома ключовими факторами. Це, зокрема, ефективність перетворення базового

модуля, ефективність системи охолодження, а також зниження продуктивності через температурні коливання фотоелементів та щорічну поступову деградацію модулів, ефективності інвертора, який здійснює перетворення струму з постійного на змінний (DC/AC), також суттєво впливає на загальну продуктивність системи.

$$\eta_{PV} = \eta_{module} \cdot \eta_{pc} \cdot \eta_{temp} \cdot \eta_{ins}(1 - (j - 1) \times \eta_d) \quad (2.5)$$

Енергетична ефективність фотомодулів має тенденцію лінійно знижуватися із підвищенням температури порівняно з базовою умовою, прийнятою за 25 °C, що відображено у виразі (2.6).

$$\eta_{temp} = [1 - \beta(T_{c,h} - T_{c,ref})] \quad (2.6)$$

де

$$T_{c,h} = T_{a,h} + [(NOCT - 20)/800] \times H_{I,h} \quad (2.7)$$

У виразах β і NOCT знаходяться в залежності від типу обраного фотомодуля та визначаються за даними виробника.

2.4. Математична модель процесів накопичення енергії

Потужність системи накопичення енергії АСНЕ визначається номінальною потужністю та числом годин автономної роботи ($h_{АН}$). Показник автономна година вказує на кількість годин, протягом яких повністю заряджена батарея може забезпечувати потреби в енергії, виходячи із середнього годинного навантаження $E_{L,a}$.

$$h_{АН} = (K_B \cdot \eta_{ins} \cdot \eta_{dch} \cdot DOD)/E_{L,a} \quad (2.8)$$

Зовнішня температура значно впливає на продуктивність системи накопичення енергії (АСНЕ). При температурі нижче 20°C потужність знижується на 1% на кожен градус, тоді як підвищена температура прискорює процеси старіння та саморозряду батареї. Для запобігання втратам ємності рекомендовано передбачати розміщення системи АСНЕ у приміщенні з контрольованим кліматом, підтримуючи температуру на рівні 25 °C. У процесі заряджання, коли вироблена фотоелектрична енергія $E_{A,h}$ перевищує поточний попит на електроенергію $E_{L,h}$, рівень заряду батареї $SOC_{B,h}$ описується (2.9).

$$SOC_{B,h} = \max \{ SOC_{B,h-1} \cdot (1 - \sigma) + [(E_{A,h} - E_{L,h}) / \eta_{in9}] \times \eta_{ch}, K_B^{max} \} \quad (2.9)$$

Процес заряджання завершується, коли система АСНЕ досягає своєї максимальної потужності або коли доступна для накопичення енергія, що є різницею між виробленою і споживаною енергією, вичерпується. У випадку, коли виробництво фотоелектричної енергії $E_{A,h}$ не може покрити енергетичні потреби $E_{L,h}$, система АСНЕ переходить у режим розряджання, використовуючи наявний запас накопиченої енергії згідно з (2.10). Процес розрядки триває, доки не досягнуто нижньої межі потужності батареї або доки потреба в енергії не буде повністю покрита.

$$SOC_{B,h} = \min \{ SOC_{B,h-1} \cdot (1 - \sigma) - (E_{L,h} - E_{A,h}) / (\eta_{in9} \cdot \eta_{dch}), K_B^{min} \} \quad (2.10)$$

Для рівнянь (2.9) і (2.10) стартовий заряд системи АСНЕ $SOC_{B,h} = K_B^{min}$.

2.5 Моделювання показника економічної ефективності роботи

Оцінка економічної ефективності системи PV-АСНЕ охоплює

розрахунок рівня витрат на електроенергію та аналіз терміну експлуатації системи. Нижче надається детальний опис цих аспектів економічної оцінки.

Показник LCOE є загальноприйнятим методом для визначення економічної доцільності систем, що працюють на основі відновлюваних джерел енергії (ВДЕ), а також для оцінки традиційних електростанцій. У цьому контексті LCOE можна розглядати як еквівалент тарифу на електроенергію, який встановлюється на такому рівні, щоб дискontовані доходи R_j дорівнювали дискontованим витратам C_j протягом усього строку роботи системи PV-ACHE. В результаті LCOE визначає середню вартість виробленої електроенергії, що дозволяє економічно порівнювати різні технології генерації. Рівняння (2.11) формулює LCOE як баланс між загальними доходами та витратами за період експлуатації системи.

$$\sum_{j=1}^n \frac{R_j}{(1+occ)^j} = \sum_{j=1}^n \frac{LCOE \times (1+g)^{j-1} \times E_j}{(1+occ)^j} = C_0 + \sum_{j=1}^n \frac{C_j \times (1+g)^{j-1}}{(1+occ)^j} \quad (2.11)$$

З виразу (2.11) видно, що LCOE рівне частці від поділу суми витрат на виробництво енергії, як з урахуванням інфляції так і дискontовання.

$$LCOE = (C_0 + \sum_{j=1}^n \frac{C_j \times (1+g)^{j-1}}{(1+occ)^j}) / \sum_{j=1}^n \frac{E_L \times (1+g)^{j-1}}{(1+occ)^j} \quad (2.12)$$

У запропонованій моделі цільова функція спрямована на мінімізацію витрат для забезпечення необхідного обсягу енергопостачання. З цієї причини в рівнянні (2.12) річний обсяг виробництва енергії E_j замінено на річну базову електропотребу E_L , щоб орієнтуватися на фактичну потребу в енергії, а не на загальний обсяг виробництва.

2.6 Часовий аналіз вартісних показників системи PV-ACNE

Витрати на систему PV-ACNE складаються з кількох складових, що включають витрати на фотоелектричні модулі (разом з необхідною інфраструктурою), інвертори, акумуляторні батареї та контролер заряду батареї. Витрати на PV-модуль (мультикристалічної технології) та витрати на його встановлення $C_{PV}(P_0)$, а також витрати на інвертор $C_{inv}(P_0)$, визначаються як функція номінального значення потужності фотомодуля P_0 . Затрати на акумуляторну батарею та зарядний контролер спряжені з ємністю батареї та величиною вхідного струму. Вираз (2.13) надає загальну формулу для витрат на систему PV-ACNE:

$$C_0 = C_{PV}(P_0) + C_{inv}(P_0) + C_{cc} P_0 / V_B + C_B \cdot K_B \quad (2.13)$$

Щодо експлуатаційних річних витрат, то на тривалості усього строку служби системи PV-ACNE необхідно проводити регулярне технічне обслуговування та заміну критичних компонентів, таких як інвертори, акумулятори та контролери заряду, щоб уникнути можливих збоїв та зниження ефективності роботи системи. Крім того, витрати на купівлю енергії з мережі залежать від тарифу на електроенергію в мережі e_c , а продаж енергії в мережу підлягає розрахунку за ринковою ціною електроенергії e_p . Це визначає альтернативні витрати, які можна виразити за рівнянням (2.14):

$$C_j = C_j^{OM\&I} + C_j^E + C_j^B + C_j^I \times C_j^E - C_j^S \quad (2.14)$$

На першому етапі було запропоновано пошуковий метод для управління енергоспоживанням у мікромережі, який також слугує еталоном для оцінки ефективності більш складних оптимізаційних алгоритмів. Цей пошуковий

метод визначає необхідну потужність батареї за допомогою набору правил, що забезпечують роботу системи в межах встановлених обмежень. Алгоритм реалізований на основі такого методу є простим і враховує лише поточний момент часу, не маючи довгострокових прогнозів на певний період. Варто зазначити, що в цьому методі не передбачено врахування жодної функції вартості, що обмежує використання для комплексних завдань.

На рис. 2.3 представлена блок-схема алгоритму, а позначення потоків потужності можна знайти на рис. 2.4.

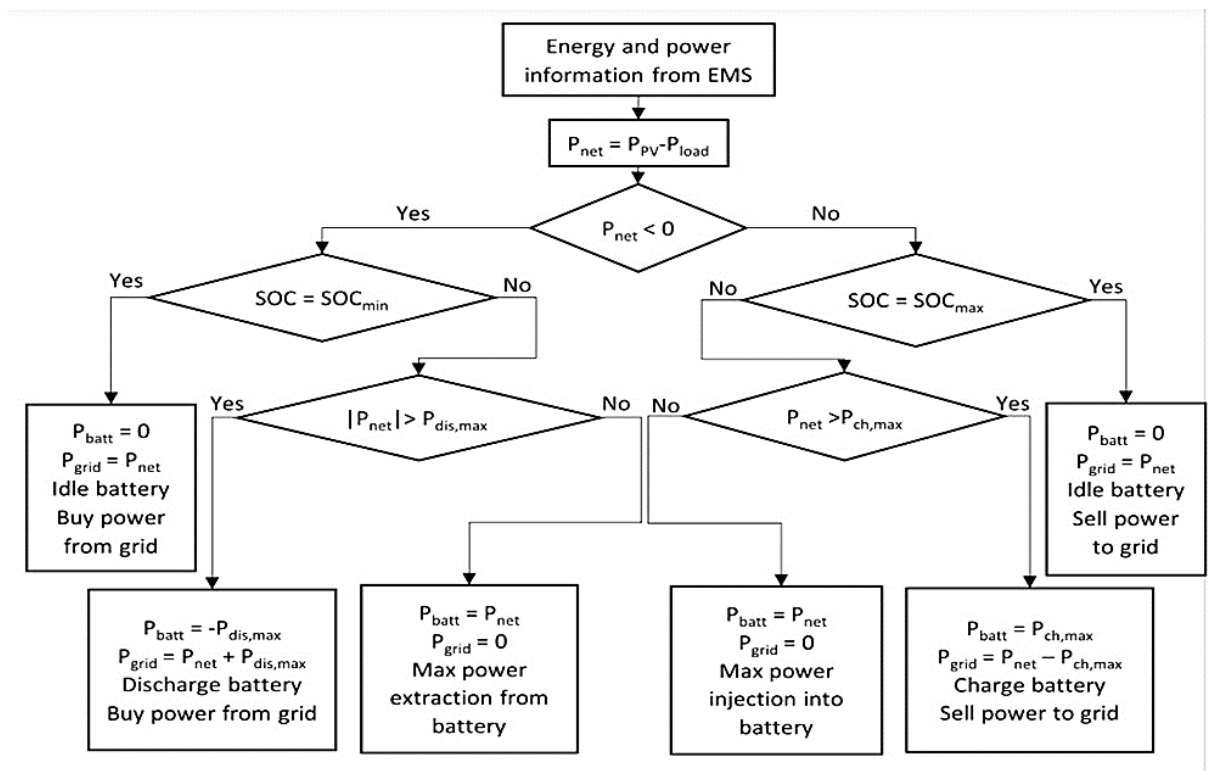


Рисунок 2.3 – Схематичне зображення алгоритму з пошуковим методом

До алгоритму надходять відомості про енергію і значення потужності від системи управління енергоспоживанням (СУЕ). Отримана інформація дозволяє обчислити чисту потужність. При від'ємному значенні потужності, це свідчить про те, що потужності, виробленої фотоелектричними модулями, недостатньо для забезпечення навантажень, і в такому разі батарея повинна

розряджатися для покриття попиту. Однак розрядка батареї не дозволяється, якщо це призведе до порушення мінімального рівня заряду або максимальної потужності розряду і енергопотреба покривається за рахунок енергомережі.

Якщо ж чиста потужність є позитивною, це означає наявність надлишку потужності фотоелектробатарей, і її можливо направити на заряджання батареї. Однак заряджання може відбуватись лише за умови, що рівень заряду не досягнув свого максимального значення. Крім того, процес заряджання не може перевищувати максимальну потужність заряду батареї.

Також було виконано розробку алгоритму планування, який об'єднує модельне прогнозне керування (MPC) та змішане цілочисельне лінійне програмування (MILP). Основна мета – визначити оптимальні параметри заряджання та розряджання акумуляторної системи, забезпечуючи ефективність і стабільність роботи мікроенергетичної системи. В подальших дослідженнях детально сформульовано задачу оптимізації MILP, визначено ключові обмеження та багатоцільову функцію вартості. На їх основі буде застосовано методику MPC для знаходження оптимального рішення задачі. Окрім цього, розроблений алгоритм буде впроваджено в модель мікроенергетичної системи у середовищі Simulink, що дозволить оцінити його ефективність та функціональність у реальних умовах.

Далі приводяться обмеження, які формують операційну модель оптимізаційної задачі для мікроенергетичної системи. Ці обмеження встановлюють робочі рамки системи та враховують технічні та експлуатаційні характеристики компонентів мікромережі. Вони забезпечують точне відображення меж генераторів, систем зберігання енергії, навантажень та інших елементів мікроенергетичної системи. Для чіткого визначення напрямків потоків потужності в моделі використовується умовно додатні напрямки потужності, які графічно проілюстровані на рис. 2.4.

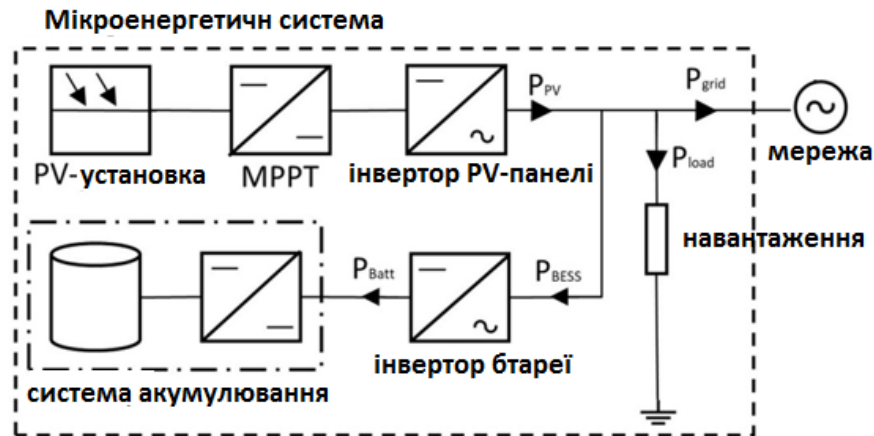


Рисунок 2.4 – Ілюстрація прийнятих умовно додатніх напрямків потужності

Такий підхід забезпечує однозначне трактування енергетичних процесів у системі та спрощує побудову математичної моделі.

Моделювання рівня заряду акумулятора. В оптимізаційній задачі модель акумулятора має відображати доступну енергію в батареї, яка оцінюється через параметр стану заряду (SOC). Величина SOC є ключовим показником, що визначає рівень заряду акумулятора у відсотках від його максимальної ємності, дозволяючи планувати заряджання та розряджання з урахуванням обмежень. Дискретна модель SOC зазвичай виражається рівнянням, подібним до формули (2.15), яке визначає SOC у поточний момент часу на основі його значення в попередньому часовому кроці, враховуючи динаміку заряджання чи розряджання:

$$SOC(k) = \begin{cases} SOC(k-1) + \frac{\eta_{ch} \times P_{batt}(k)}{E_{cap}(k)} \times \Delta t, & P_{batt}(k) \geq 0 \\ SOC(k-1) + \frac{P_{batt}(k)}{\eta_{dis} \times E_{cap}(k)} \times \Delta t, & P_{batt}(k) < 0 \end{cases} \quad (2.15)$$

де величини $SOC(k)$ та $SOC(k-1)$ відповідають рівню заряду для часу k та $k-1$ відповідно, $\frac{P_{batt}(k) \times \Delta t}{E_{cap}(k)}$ – приріст (або зменшення) енергії в акумуляторі за

часовий відтинок Δt , η_{ch}/η_{dis} коефіцієнт ефективності зарядження/розрядження акумулятора, а $E_{cap}(k)$ – значення загальної ємності акумулятора для часу k . E_{cap} є динамічною величиною по причині постійної деградації акумуляторів.

Якщо P_{batt} додатне то протікає процес зарядки, а якщо P_{batt} негативний то відповідно відбувається розрядження. Щоб представити цю логічну умову в математичну модель вводиться бінарна змінна δ , визначена виразом (2.16), і тим самим унікається можливість одночасного заряду і розряду:

$$\delta_{\sigma}(k) = \begin{cases} 0, & \text{для зарядки} \\ 1, & \text{для розрядки} \end{cases} \quad (2.16)$$

З урахуванням прийнятих додатніх напрямків енергії для акумулятора можна визначити потужність наступним чином:

$$P_{batt}(k) = P_{ch}(k) \cdot (1 - \delta_{\sigma}(k)) - P_{dis}(k) \cdot \delta_{\sigma}(k) \quad (2.17)$$

де величини $P_{ch}(k)$ і $P_{dis}(k)$ – являють собою значення потужностей, які передаються в/з пристрою акумуляування в процесі заряду або розряду в часовий момент (k) , відповідно.

Скориставшись властивістю адитивності процесів заряду і розряду можна замість двох отримати монорівняння для рівня заряду SOC:

$$SOC(k) = SOC(k-1) + \frac{\eta_{ch} \times P_{ch}(k)}{E_{cap}(k)} \times \Delta t - \frac{P_{dis}(k)}{\eta_{dis} \times E_{cap}} \times \Delta t \quad (2.18)$$

З метою продовжити термін праці акумуляторів слід уникати глибоких розрядів та стану перезарядження. Зазначеним обмеженням відповідає максимальний та мінімальний рівень заряду:

$$SOC_{min} \leq SOC(k) \leq SOC_{max} \quad (2.19)$$

Тоді вирази (2.18) і (2.19) можна подати одним рівнянням для SOC:

$$SOC_{min} - SOC(k-1) \leq \frac{\eta_{ch} \times P_{ch}(k)}{E_{cap}(k)} \times \Delta t - \frac{P_{dis}(k)}{\eta_{dis} \times E_{cap}(k)} \times \Delta t \leq SOC_{max} - SOC(k-1) \quad (2.20)$$

Обмеження, представлене у формулі (2.21), часто додають до оптимізаційної задачі для запобігання повному розрядженню акумулятора. Воно забезпечує, щоб стан заряду (SOC) наприкінці прогнозного терміну залишався на тому ж рівні, що й на початку терміну:

$$SOC(N) = SOC(0) \quad (2.21)$$

де параметр $SOC(N)$ – ступінь заряду батареї для кінцевого терміну N , а $SOC(0)$ – рівень заряду на початковому етапі терміну N .

Для відображення фізичних обмежень на потужність батареї вводяться відповідні обмеження, які враховують максимальні значення потужності заряджання та розряджання за певний часовий проміжок. Зокрема, використовується двійкова змінна, визначена у формулі (2.16), яка дозволяє окремо моделювати процеси заряджання та розряджання:

$$\delta_{\sigma}(k) P_{dis}^{min} \leq P_{dis}(k) \leq \delta_{\sigma}(k) P_{dis}^{max} \quad (2.22)$$

$$(1 - \delta_{\sigma}(k)) P_{ch}^{min} \leq P_{ch}(k) \leq (1 - \delta_{\sigma}(k)) P_{ch}^{max} \quad (2.23)$$

Такі обмеження гарантують, що батарея працює у безпечному режимі,

запобігаючи перегріву, перенапрузі чи надмірному зносу. Водночас, вони забезпечують гнучкість управління заряджанням/розряджанням, враховуючи поточний енергетичний баланс мікроенергетичної системи.

Режими узгодження з центральною мережею. У режимі роботи, за якого наявне підключення до основної мережі, мікроенергетична система має можливість як продавати, так і купувати електроенергію залежно від потреби або надлишку енергії. Для точного моделювання цієї взаємодії та запобігання ситуаціям, коли мікроенергетична система одночасно продає та купує енергію, у математичну модель оптимізації вводиться бінарна змінна, яка визначена у виразі (2.24) і забезпечує чітке розмежування між станами продажу та купівлі.

$$\delta_{\sigma}(k) = \begin{cases} 0, & \text{для продажу енергії в мережу} \\ 1, & \text{на купівлю енергії з електромережі} \end{cases} \quad (2.24)$$

Враховуючи умовно додатні напрямки енергопотоків що відповідає рис. 2.4 взаємодію з основною мережею зручно представити таким виразом:

$$P_{grid}(k) = P_{sell}(k) \cdot (1 - \delta_{\sigma}(k)) - P_{buy}(k) \cdot \delta_{\sigma}(k) \quad (2.25)$$

де величини $P_{sell}(k)$ та $P_{buy}(k)$ – суть потужність, передана в/з зовнішньої мережі станом на момент часу (k) , відповідно.

Накладені обмеження виразами (2.26) і (2.27) є частиною формулювання задачі з метою відображення ліміту на максимальну відбираєму з мережі потужність, та максимальне значення для потужності дозволеної до передачі з мікромережі до основної мережі.

$$0 \leq P_{buy}(k) \leq \delta_{\sigma}(k) P_{bly}^{max} \quad (2.26)$$

$$0 \leq P_{sell}(k) \leq (1 - \delta_{\sigma}(k)) P_{sell}^{max} \quad (2.27)$$

Визначення балансу потужності. У мікромережі баланс величин виробництва і споживанням електроенергії має підтримуватися кожного моменту часу. Це досягається шляхом постійного виконання рівняння (2.14), в якому враховано коефіцієнти ефективності енергетичного перетворення, а також задано умовно додатні спрямування потужностей по рис. 2.4.

$$P_{load}^{*}(k) = P_{pv}^{*}(k) + \eta_{inv}(k) \times P_{dis}(k) - \frac{P_{ch}(k)}{\eta_{inv}(k)} + P_{buy}(k) - P_{sell}(k) \quad (2.28)$$

де величини $P_{load}^{*}(k)$ та $P_{pv}^{*}(k)$ – прогнозовані профілі кривих навантаження та видачі фотоелектричної потужності, відповідно;

$\eta_{inv}(k)$ коефіцієнт ефективності акумуляторного інвертора, варіюється відповідно до заряду акумулятора.

Визначення цільової функції. У задачі оптимізації необхідно сформулювати цільову функцію для забезпечення оптимального функціонування мікромережі. До розгляду приймається багатоцільова оптимізаційна задача, спрямована на знаходження оптимального рішення для кількох конкуруючих цілей. В подальшому матеріалі окремо описано кожен зі складових цільової функції та результуючу цільову функцію, яка їх поєднує.

Функціональна залежність витрат мережі. Першою метою є зниження сукупних витрат на електроенергію за умовами змінного тарифу. Це завдання може бути представлене як різниця між витратами на закупівлю енергії з централізованої мережі та доходом від продажу надлишкової енергії до цієї ж мережі.

$$J_{grid} = \sum_{k=0}^{N-1} (c_{buy}(k) \times P_{buy}(k) - c_{sell}(k) \times P_{sell}(k)) \Delta t \quad (2.29)$$

тут N представляє горизонт оптимізації, $c_{buy}(k)$ – це вартість закупівлі електроенергії з основної мережі у часовий момент k , а $c_{sell}(k)$ – ціна продажу енергії в мережу в той же момент, потужність, що продається або купується, позначається відповідно як $P_{sell}(k)$ і $P_{buy}(k)$. Період вибірки часу визначається як Δt .

Функціональна залежність вартості батареї. Мінімізація значення функції витрат живлячої мережі забезпечує економію на рахунках за електроенергію, але часте використання акумулятора, пов'язане з циклічним заряджанням і розряджанням, може знижувати його термін служби. Кожен цикл акумулятора додає витрати на його зношування, тому доцільно зменшити кількість таких циклів протягом доби. Отже, крім функції витрат на електроенергію, в оптимізаційну модель варто включити ще й функцію, яка представляє додаткові витрати, пов'язані з циклами заряджання акумулятора. Альтернативні витрати таких циклів можна розрахувати за допомогою формули (2.30), в якій зміна енергії акумулятора, ΔE_{batt} , помножена на ваговий коефіцієнт витрат акумулятора c_b , який використовується для штрафу циклів заряджання. Параметр c_b може бути визначений різними методами.

$$J_{battery} = \sum_{k=0}^{N-1} \Delta E_{batt}(k) \times c_b \quad (2.30)$$

де $\Delta E_{batt}(k)$ – абсолютне значення приросту енергії батареї для проміжків часу від $k-1$ до k та визначається виразом:

$$\Delta E_{batt}(k) = |E_{batt}(k) - E_{batt}(k-1)| = \left(\eta_{ch} \times P_{ch}(k) + \frac{P_{dis}(k)}{\eta_{dis}} \right) \times \Delta t \quad (2.31)$$

Сполучивши (2.30) і (2.31) вираз для залежності вартості батареї буде:

$$J_{battery} = \sum_{k=0}^{N-1} \left(\eta_{ch} \times P_{ch}(k) + \frac{P_{dis}(k)}{\eta_{dis}} \right) \times \Delta t \times cb \quad (2.32)$$

Функціональна залежність глобальних витрат. Кожна з двох згаданих вище цілей представлена окремими складовими в наступній функції глобальних витрат. Ця функція поєднує мінімізацію витрат на енергію та альтернативні витрати на цикли заряду акумулятора, щоб досягти оптимального балансу між економією на рахунках за електроенергію:

$$J = J_{grid} + J_{battery} \quad (2.33)$$

Дві цілі глобальної функції витрат суперечать одна одній, оскільки єдиного рішення для одночасної оптимізації обох не існує. Тому важливо знайти компроміс між економією на електроенергії та зменшенням деградації акумулятора.

Модель прогнозного керування з лінійним змішаним цілочисловим програмуванням. На основі раніше визначених обмежень та цільової функції, можна сформулювати загальну оптимізаційну задачу для мінімізації функції витрат J (2.33) з урахуванням таких складових:

- модель зберігання енергії (2.18)
- обмеження для акумуляування (2.20), (2.21), (2.22), (2.23) (2.34)
- обмеження зі сторони мережі (2.26), (2.27)
- баланс енергоспоживання та генерації (2.28)
- обмеження для бінарних змінних (2.16), (2.24).

Таким чином, модель прогнозного керування може бути описана як задача лінійного змішаного цілочислового програмування, яка поєднує економічні та технічні обмеження для досягнення оптимальної роботи мікромережі. Ця оптимізаційна задача належить до категорії нелінійного програмування при змішаних цілих числах (MINLP) та неопуклою функцією

витрат, оскільки включає нелінійну поведінку таких параметрів як ємність батареї, коефіцієнта ефективності напівпровідникових пристроїв. Вирішення такої задачі дозволяє отримати оптимальний графік для заряду акумуляторів. Проте цей графік може виявитися чутливим до невизначеностей, оскільки модель системи може бути неповною, передбачення можуть містити помилки, а реальний розвиток стану системи може відхилятися від запланованого. Єдиний розв'язок оптимізаційної задачі забезпечує результат у розімкнутому циклі, який не враховує можливі невизначеності в системі.

Альтернативним підходом до розв'язання задачі оптимізації є використання методології модельного предиктивного керування (MPC), яка інтегрує механізм керування зі зворотним зв'язком. Такий підхід дозволяє враховувати та потенційно компенсувати виникаючі в роботі невизначеності.

При використанні MPC задача оптимізації перетворюється на задачу змішаного цілочисельного лінійного програмування (MILP), що вигідніша в порівнянні з методами змішаного цілочисельного нелінійного програмування (MINLP) завдяки меншим обчислювальним витратам; доступності ефективних розв'язувачів для MILP; гарантоване знаходження глобального оптимального розв'язку; незначна втрата точності порівняно з MINLP.

У роботі пропонується підхід, що включає MPC і MILP, для ефективного управління невизначеностями та врахування часткової нелінійної динаміки системи через постійне оновлення моделі на кожному часовому кроці. Структурну схему контролера MPC наведено на рис. 2.5, яка ілюструє процес роботи алгоритму та інтеграцію з іншими компонентами системи.

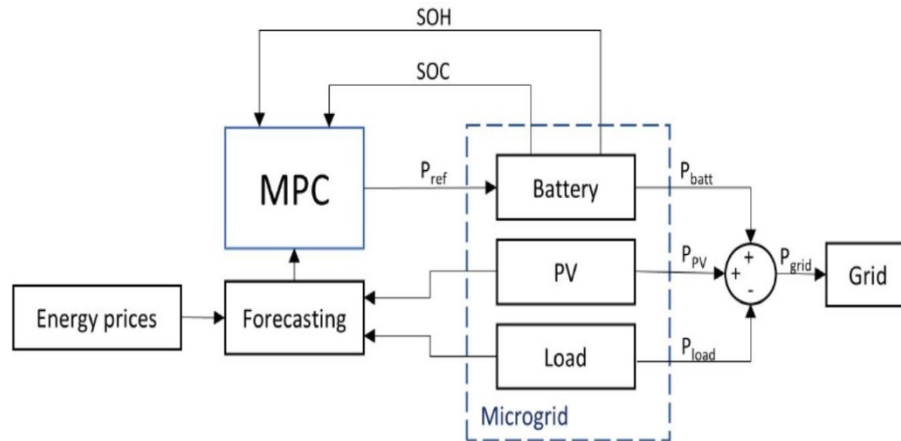


Рисунок 2.5 – Структурна схема контролера МПК

На кожному етапі управління необхідно побудувати оптимізаційну модель для визначеного горизонту прогнозування Np . Ця модель розробляється на основі актуалізованих параметрів стану системи, таких як рівень заряду акумулятора $SOC(0)$ та показник збереження його ефективності $SOH(0)$. Водночас враховуються коефіцієнт корисної дії елементів силової електроніки, дані прогнозів щодо майбутнього споживання енергії, її генерації та очікувані коливання ринкових цін. Система забезпечує регулярне оновлення основних станів акумуляторів за допомогою моделі SimSES, яка дозволяє врахувати їхню деградацію та зношування. Коефіцієнт ефективності перетворювачів енергії розраховується із застосуванням математичного виразу, що відображає залежність від поточних умов роботи компонентів:

$$\eta_{inv} = \frac{p}{p+p0+k \times p2} \text{ де } p = \frac{|P_{out}|}{P_{rated,inv}} \quad (2.35)$$

Ця оптимізаційна задача має кілька цілей: мінімізувати загальні витрати, пов'язані з енергопостачанням, максимізувати використання відновлюваних джерел енергії, зберігаючи екологічний баланс, і забезпечити відповідність прогнозованому попиту. Рішення враховує генерацію електроенергії та

розподіл ресурсів між локальними джерелами енергії та зовнішньою мережею, включаючи процеси заряджання та розряджання батарей.

Важливо зазначити, що для спрощення розрахунків у межах задачі оптимізації ефективність компонентів системи та стан батарей SOH приймаються як постійні протягом усього горизонту прогнозування. Такий підхід дозволяє звести задачу до лінійної форми та застосувати метод змішаного цілочисельного лінійного програмування (MILP), що забезпечує швидке й ефективне знаходження оптимального розв'язку.

Щоб забезпечити можливість розв'язання загальної задачі оптимізації, представленої у вигляді рівняння (2.34), її слід адаптувати до формату, який підтримується доступними розв'язувачами змішаного цілочисельного лінійного програмування (MILP). У межах цього дослідження пропонується застосування функції *intlinprog* у середовищі MATLAB. Для цього оптимізаційну задачу потрібно трансформувати у матричну форму, представлену у вигляді рівняння (2.36).

Мінімізація (u) виразу J_u^T в разі якщо $u(\text{intcon})$ є цілочисельним, (2.36)

$$\begin{aligned} \mathbf{A}_{ineq} \times u &\leq \mathbf{b}_{ineq} \\ \mathbf{A}_{eq} \times u &\leq \mathbf{b}_{eq} \\ \mathbf{l}_b &\leq u \leq \mathbf{u}_b \end{aligned} \tag{2.36}$$

де змінні рішення представлені вектором

Висновки до другого розділу

Аналіз виконаних досліджень демонструє, що значне скорочення витрат на електроенергію досягається завдяки раціональному використанню акумуляторних систем. Це зокрема передбачає заряджання акумулятора в періоди низьких тарифів і його розряджання під час пікових цін на

електроенергію. Такий підхід сприяє оптимальному управлінню ресурсами мікроенергетичної системи і підвищенню економічної ефективності.

Застосовані методи оптимізації роботи мікромереж із накопичувачами спрямовані на вирішення багатокритеріальних задач, серед яких мінімізація витрат на електричну енергію є ключовим критерієм. Використання змішаних методів, таких як MILP і модельне прогнозне управління (MPC), дозволяє врахувати технічні, економічні та екологічні аспекти в межах оптимізації.

Для оцінки ефективності роботи систем із накопичувачами енергії застосовано методику розрахунку рівня витрат на виробництво електроенергії (LCOE, Levelized Cost of Electricity). Цей показник дозволяє кількісно оцінити економічну доцільність системи з урахуванням витрат на встановлення, експлуатацію та обслуговування накопичувачів упродовж їх життєвого циклу. Таким чином, економічна оцінка, проведена на основі LCOE, дає змогу порівнювати ефективність різних стратегій управління мікроенергетичними системами і приймати обґрунтовані рішення щодо їх впровадження.

РОЗДІЛ 3

КОМП'ЮТЕРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ РОБОТИ МІКРОЕНЕРГЕТИЧНОЇ СИСТЕМИ З ДОСЛІДЖЕННЯМ ВПЛИВУ СИСТЕМИ НАКОПИЧЕННЯ ЕНЕРГІЇ

Для досягнення оптимальної роботи систем накопичення енергії в мікромережі необхідна інтеграція сучасної системи управління та моніторингу. Така система забезпечує ефективне підтримання балансу між виробництвом і споживанням енергії, регулює потужність та напругу, що є особливо важливим для автономних мереж низької напруги, які використовують відновлювані джерела енергії, наприклад, сонячні панелі (PV), для генерації електроенергії. Акумуляторні системи в цьому контексті виступають ключовими елементами для зберігання надлишкової енергії та її використання в моменти дефіциту. Запропонована система управління базується на технології «ведучий/ведений», яка передбачає наявність надійної комунікаційної інфраструктури для координації дій між генерацією, зберіганням та споживанням енергії. Це дозволяє оперативно адаптувати режим роботи мікромережі до поточних умов і мінімізувати втрати.

3.1 Методологія управління активними розподільчими мережами

Активна розподільча мережа характеризується інтерактивністю та двосторонністю енергопотоків, що дозволяє ефективніше інтегрувати децентралізовані джерела генерації. Потік енергії здійснюється не лише від генераторів до споживачів, але й у зворотному напрямку, коли надлишкова енергія, вироблена, наприклад, сонячними чи вітровими установками, повертається до мережі для перерозподілу або зберігання.

Цей перехід від однонаправленої до двосторонньої моделі електромереж сприяє створенню більш адаптивної та стійкої енергосистеми. Інтеграція ВДЕ

забезпечує не лише підвищення енергетичної незалежності та зниження вуглецевого сліду, але й відкриває нові можливості для розвитку інтелектуальних мереж (Smart Grid), які здатні динамічно регулювати баланс між виробництвом і споживанням електроенергії.

Для забезпечення успішного переходу слід зосереджувати більше зусиль на розвитку надійних і стійких енергетичних мереж. У той же час, розвинені держави стикаються зі складними технічними й економічними перешкодами, які потребують інноваційних рішень. Це включає впровадження адаптивного та розумного управління, зокрема використання технологій «розумних мереж» і мікроенергетичних систем.

Ці фактори об'єднуються, створюючи сприятливі умови для впровадження та розвитку мікромереж, які не тільки відповідають сучасним потребам у надійному електропостачанні, але й допомагають знизити вплив енергетичного сектору на навколишнє середовище.

Для досягнення стабільної, безпечної та ефективної роботи мікроенергетичних систем, а також для перемикання між режимами без порушення регулювання та системних обмежень, необхідне якісне управління та контроль мережі. Це забезпечується за допомогою комплексної системи, яка включає центральний контроль, контролер відновлюваної енергії, систему енергоменеджменту, а також системи захисту та моніторингу.

Пристрій для контролінгу відновлюваної енергії виконує локальне управління відновлюваними джерелами енергії, оптимізуючи виробництво електроенергії відповідно до поточних потреб та доступних ресурсів. Системи захисту та координації відповідають за своєчасну реакцію на основні збої в роботі мікроенергетичних систем, забезпечуючи адаптивний захист, який враховує зміни струму несправності при переході з підключеного до мережі режиму на автономний.

Центральна система контролю виконує загальні функції з регулювання та контролю роботи мікромережі. Основне її завдання полягає в підтримці стабільної роботи шляхом регулювання частоти та потужності, забезпечення

належної якості електроенергії, а також контролю напруги через корекцію реактивної потужності. Вона також відповідає за економічно обгрунтовану диспетчеризацію навантаження, планування рівня генерування та менеджмент купівлі/продажу електроенергії в залежності від поточних умов на ринку та потреб мережі.

Всі контролери в мікроенергетичній системі розроблені для умов автономної роботи, також передбачено перехід на ручне керування у будь-який момент, що дозволяє підвищити надійність та гнучкість управління. Використання цих контролерів сприяє активній диспетчеризації розподільчої мережі в складі мікроенергетичної системи, забезпечуючи безпечну та економічну роботу як у режимі підключення до загальної мережі, так і в автономному режимі.

Незважаючи на значний прогрес у розвитку таких систем, деякі аспекти проектування системи управління таких мереж потребують подальших досліджень. Це необхідно для створення інтелектуальних рішень, які дозволять розвивати активні розподільчі мережі, підвищуючи їх гнучкість та адаптивність до змінних умов роботи.

3.2 Аналіз архітектурних та функціональних особливостей мікроенергетичних систем

Для забезпечення оптимального стану системи накопичення енергії в мікроенергетичній системі потрібна система управління та моніторингу, яка дозволить ефективно балансувати потоки енергії та потужності, а також здійснювати регулювання напруги в умовах низьковольтної острівної мережі. Така мережа використовує сонячні панелі (PV) для генерації електроенергії та акумулятори для її накопичення, що забезпечує постійний доступ до енергії в разі переривання зовнішнього електропостачання.

Система управління повинна працювати за принципом «ведучий/ведений», що передбачає наявність потужної та надійної

комунікаційної інфраструктури для координації виробництва, зберігання та споживання енергії. Такий підхід дозволяє ефективно розподіляти навантаження між компонентами системи, забезпечуючи стійкість та гнучкість роботи мікроенергетичної системи.

У випадку частих перерв постачання електрики система керування застосовує стратегію пріоритетів для навантажень та їх відключення, щоб підтримувати подачу електроенергії до критично важливих споживачів. Завдяки цьому можна зберегти стабільне енергопостачання для найважливіших об'єктів, навіть коли ресурси обмежені.

Запропонована система управління дозволяє досягти оптимальний баланс енергії у мікроенергетичній системі, сприяючи ефективному використанню накопиченої енергії та стабільному функціонуванню мережі. Вона дозволяє не лише підтримувати баланс потужностей, але й автоматично адаптуватися до змін у споживанні та виробництві енергії, забезпечуючи надійну роботу Microgrid в різних режимах роботи.

Мікроенергетичні системи на основі постійного струму. На рис. 3.1 проілюстровано, різні елементи мікроенергетичної системи, такі як фотоелектричні панелі, вітрові турбіни та інші відновлювані джерела енергії, а також акумулятор і споживачі, підключені до загальної шини постійного струму. Кожен із цих компонентів має індивідуальну систему перетворювачів, яка забезпечує стабільну та ефективну передачу енергії.

Шина сталого струму з'єднана з основною електромережею за допомогою двонаправленого перетворювача типу DC-AC, який виконує обмін енергією між мікроенергетичною системою та мережею. Цей перетворювач дозволяє як передавати надлишок генерованої енергії в мережу, так і отримувати енергію в разі потреби для підтримання балансу потужності. Це сприяє стабільній роботі системи, забезпечуючи узгодженість між споживанням та генерацією енергії.

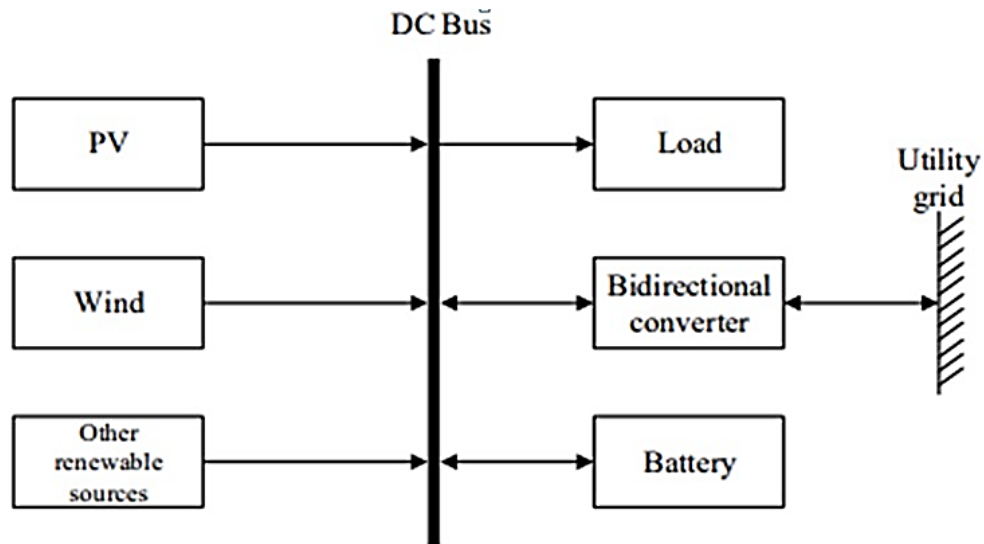


Рисунок 3.1 – Мікроенергетична система на основі використання сталого струму

Переваги використання мікроенергетичних систем на основі постійного струму можна визначити такими ключовими аспектами: 1) збільшення енергоефективності, система постійного струму дозволяє зменшити втрати на перетворення енергії, оскільки потреба в багаторазових перетвореннях між постійним і змінним струмом знижується, а це значно покращує загальну енергоефективність та зменшує втрати; 2) простота інтеграції ВДЕ, використання постійної напруги значно полегшує інтеграцію, управління та координацію ВДЕ, а завдяки тому, що управління базується на постійній напрузі, стає простіше контролювати параметри системи; 3) вищий рівень ефективності живлення навантаження, спричинений тим що у системах постійного струму забезпечується стабільне та ефективне постачання енергії для навантаження, оскільки перетворення енергії мінімізуються, що знижує втрати при передачі; 4) гнучке регулювання енергії за допомогою акумуляторів, причому завдяки акумуляторам стає можливим регулювання коливань навантаження та генерації з ВДЕ, що дозволяє швидко компенсувати дефіцит потужності у разі її нестачі; 5) оптимізована робота обертових генераторів ВДЕ, адже система на постійному струмі усуває необхідність у

синхронізації обертових ВДЕ-генераторів, що полегшує їхнє функціонування та підвищує надійність роботи; 6) полегшене гасіння циркулюючих струмів між ВДЕ, які у мережах постійного струму простіше контролювати і обмежувати циркулюючі струми між різними джерелами, що дозволяє уникнути надмірних втрат та забезпечити стабільність системи; 7) полегшена інтеграція в загальну електромережу: системи на постійному струмі простіше інтегрувати в існуючі електромережі, оскільки потреба в додаткових перетвореннях і синхронізації знижується, що покращує керованість.

Одним з основних недоліків використання мікроенергетичних систем на основі постійного струму є те, що більшість електричних навантажень працює на змінному струмі. Це означає, що для забезпечення сумісності з таким обладнанням необхідно використовувати інвертори, які перетворюють постійний струм у змінний, що збільшує вартість та знижує ефективність.

Крім того, у мікромережах постійного струму спостерігається поступове зниження напруги вздовж довжини мережі, що є особливо помітним на віддалених ділянках. Це призводить до того, що на кінцевих точках мережі рівень напруги може бути недостатньо високим для стабільного живлення навантаження, особливо у середніх і великих розподільчих системах. Таким чином, для забезпечення стабільного рівня напруги необхідне використання проміжних пристроїв для підвищення напруги, що дозволяє підтримувати її на потрібному рівні навіть на віддалених точках мікроенергетичної системи.

Мікроенергетичні системи на основі змінного струму. Електрична мережа підключена до мікроенергетичної системи змінного струму за допомогою відповідної шини, і це підключення контролюється автоматичним вимикачем, який відповідає за з'єднання та відключення мережі залежно від поточного стану системи. Структура мікроенергетичної системи змінного струму продемонстрована на рис. 3.2, де відновлювані джерела енергії, а також акумуляторна батарея підключені до шини змінного струму через відповідні перетворювачі, тоді як навантаження підключається безпосередньо, без потреби у додаткових пристроях силової електроніки.

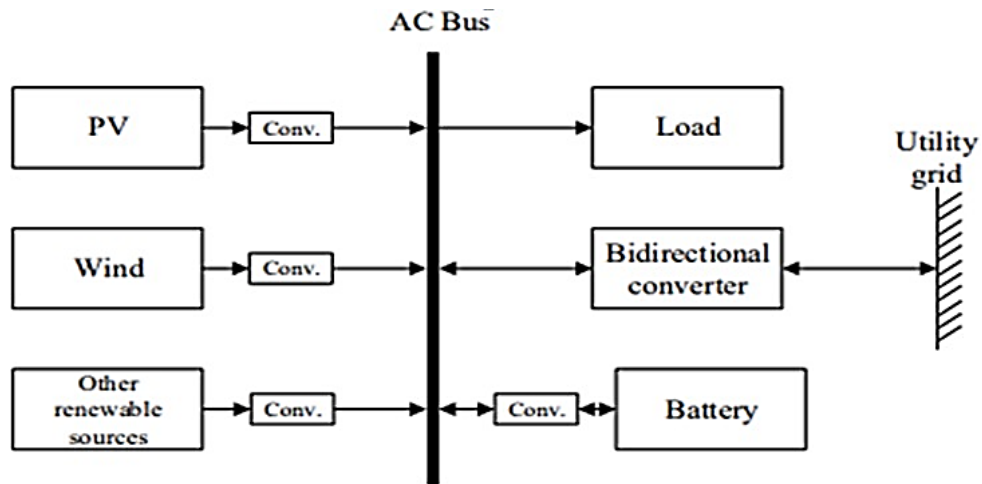


Рисунок 3.2 – Microgrid на основі використання змінного струму

Мікроенергетична система на основі змінного струму має ряд переваг, зокрема те, що вона краще підходить для живлення електричних навантажень, оскільки більшість пристроїв працює від змінного струму. Через це мережа змінного струму є має переважаючий вектор досліджень і розробок у цій сфері, оскільки найбільш наближена до типових умов експлуатації електричних систем. Однією з ключових переваг мікромережі змінного струму є можливість прямого підключення до електромережі без необхідності використання двонаправлених перетворювачів, що знижує витрати на обладнання та спрощує конфігурацію.

Проте, така система має і свої недоліки. Головною проблемою є необхідність у складній системі управління, що може ускладнювати процес експлуатації та контролю. Управління мікроенергетичною системою змінного струму вимагає ретельного контролю і координації між різними джерелами енергії, що додає складності до забезпечення її стабільної і ефективної роботи.

Мікроенергетичні системи змінного/постійного струму. Гібридна мікроенергетична система об'єднує шини змінного та постійного струму в єдину структуру, що забезпечує універсальність та ефективність, як видно з рис. 3.3. Шина змінного струму безпосередньо з'єднана з електромережею без необхідності використання перетворювачів, що дозволяє їй жити пристрої

та навантаження змінного струму. Це сприяє зниженню втрат та підвищенню ефективності передачі енергії до споживачів бо немає зайвих перетворень.

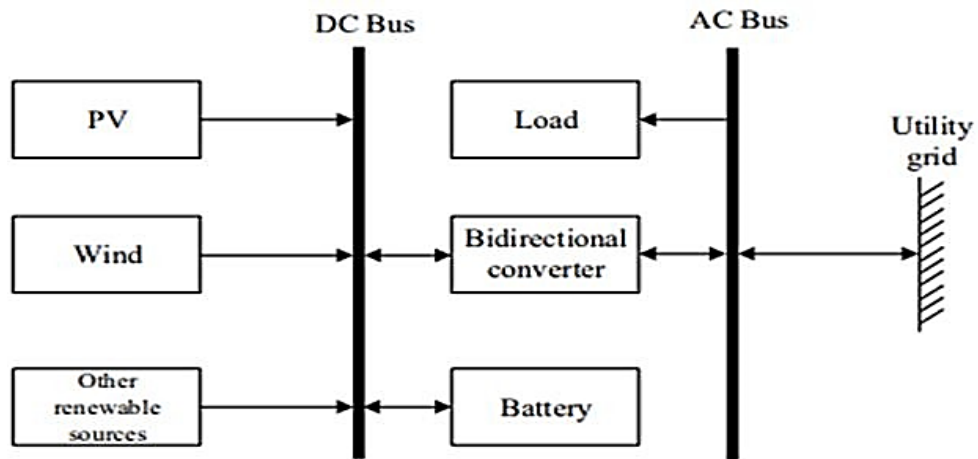


Рисунок 3.3 – Структура гібридної Microgrid двох типів струму

Шина постійного струму, у свою чергу, з'єднує фотоелектричні панелі, вітрові турбіни, інші відновлювані джерела енергії та акумуляторні батареї безпосередньо, що дозволяє оптимально використовувати ці джерела для живлення навантажень сталого струму. Якщо в системі є пристрої, які працюють на постійному струмі, їх можна живити безпосередньо від шини постійного струму, що знижує кількість перетворень енергії, тим самим підвищуючи загальну ефективність мікромережі.

Для забезпечення енергетичного балансу та підтримки взаємодії між шинами змінного та постійного струму використовується двонаправлений перетворювач. Він дозволяє обмінюватися енергією між шинами, забезпечуючи гнучкість у використанні різних джерел енергії. Зокрема, він підтримує живлення навантажень змінного струму, накопичення надлишкової дешевої електроенергії в акумуляторах, а також виконує важливі функції підтримки роботи мережі, такі як забезпечення стабільної напруги, допоміжна підтримка, стабілізація частоти та балансування потужності.

Основною перевагою гібридної мікроенергетичної системи є те, що вона поєднує переваги як мікроенергетичної системи сталого так і змінного струму, тим самим мінімізуючи їх недоліки. Гібридна структура дозволяє одночасно використовувати переваги високої енергоефективності постійного струму для відновлюваних джерел енергії та зручності підключення до традиційної електромережі змінного струму, забезпечуючи гнучкість і надійність у задоволенні енергетичних потреб користувачів.

3.3 Оптимізація енергетичних потоків у мікроенергетичних системах з використанням інтелектуальних систем керування

Непередбачуваність у роботі електромережі, що включає змінну продуктивність ВДЕ та виникнення режимів ізольованої роботи (острівців), наголошує на критичній потребі підтримання енергетичного балансу в мікроенергетичних системах для забезпечення стабільної роботи. Змінність та нестабільність продуктивності ВДЕ створюють додаткові виклики для досягнення рівноваги між попитом і пропозицією електроенергії, що потребує інтеграції систем зберігання енергії для оптимізації використання відновлюваних джерел. Саме впровадження технологій акумулювання енергії дозволяє акумулювати надлишкову енергію, яка може бути використана у випадках підвищеного попиту або низького виробництва від ВДЕ.

Розробка системи управління енергетичними ресурсами (Energy Management System, EMS) є ключовим фактором для забезпечення ефективного і економічно обґрунтованого регуляції виробництва та розподілу енергії в мікромережах. EMS відповідає за моніторинг, контроль та координацію роботи всіх елементів мікромережі, що дозволяє підтримувати стабільну напругу та частоту, а також ефективно керувати навантаженням та розподілом енергетичних потоків. Ця система відіграє роль центрального механізму, що об'єднує управління ВДЕ, систем зберігання енергії та навантаженням, забезпечуючи тим самим гнучкість та надійність роботи

мікроенергосистеми. Таким чином, використання системи управління енергетичними ресурсами дозволяє підвищити надійність і ефективність функціонування мікроенергосистем, забезпечуючи оптимальний баланс між генерацією, зберіганням та споживанням енергії. Це сприяє стійкому та економічному використанню енергетичних ресурсів у мікроенергосистем, що є важливим кроком на шляху до інтеграції відновлюваних джерел енергії та забезпечення енергетичної незалежності.

Фотоелектрична система разом із системою зберігання енергії здатні задовольняти попит на електроенергію в мікромережі у разі відключення електромережі протягом дня. У денний час сонячна енергія забезпечує постачання електрики, а акумуляторна система може накопичувати надлишок, щоб використовувати його за потреби. Вночі або в періоди несприятливих погодних умов, коли фотоелектрична система не генерує електроенергію, тільки система зберігання енергії залишається єдиним джерелом, здатним покрити енергетичні потреби навантаження. Це додає складності у підтриманні стабільного балансу між потужністю, що генерується, і споживанням навантаженням, особливо при автономній роботі мікромережі.

Для досягнення максимальних економічних і технічних переваг, підсистеми генерування та зберігання енергії, інтегровані в мікроенергосистему, мають функціонувати під єдиним, скоординованим контролем, що реалізується за допомогою системи управління енергією (EMS). EMS забезпечує інтегроване управління як виробництвом, так і зберіганням, дозволяючи оптимально розподіляти енергоресурси та уникати дефіциту або надлишку енергії. Це особливо важливо для зниження витрат, підвищення ефективності роботи мікроенергосистем і забезпечення безперервності живлення навіть у періоди обмеженого виробництва.

Система керування – це програмний комплекс, який дозволяє ефективно управляти ресурсами розподіленої генерації, що є частиною мікроенергосистем. Вона забезпечує економне постачання електроенергії для

навантаження мікроенергосистем і підтримує її роботу в централізованому або децентралізованому режимі.

Окрім цього, система керування реалізує широкий спектр функцій: від моніторингу й обробки даних до їх обміну, а також динамічно регулює потужність генерації. Це дає змогу узгоджувати її зі зміною попиту та ринковими цінами на енергію. Загалом, система керування забезпечує оптимальне функціонування мікроенергосистем, враховуючи технічні й економічні обмеження.

Завдання управління енергією в мікроенергосистемах можна вирішувати за допомогою двох підходів до систем керування: централізованого або розподіленого (децентралізованого).

У централізованій системі керування основний контролер отримує всі дані про стан системи, обробляє їх і розробляє оптимальні рішення для управління енергетичними потоками мікроенергосистем. Після цього розроблені команди передаються до локальних контролерів для виконання. Централізовані мікроенергосистеми застосовують методи метаевристичного пошуку, математичного програмування та технології штучного інтелекту. Ці підходи дозволяють досягати оптимізації, яка враховує інформацію з усієї системи та втілюється через відповідні коригувальні дії.

У розподіленій, або децентралізованій, системі керування відсутній центральний контролер, що володіє повною інформацією про мікроенергосистему. Усі об'єкти в такій системі діють автономно, обмінюючись даними лише з найближчими вузлами й ухвалюючи незалежні рішення для підтримки стабільності та ефективності роботи.

Централізовані та децентралізовані системи керування відповідно володіють своїми особливими перевагами та недоліками, а також подібні виклики, з якими доводиться стикатися при їх застосуванні. Одним із ключових викликів є динамічна зміна попиту на електроенергію та нестабільність ВДЕ, таких як сонячне випромінювання або швидкість вітру. Ця непередбачуваність суттєво ускладнює процес оптимізації й підвищує рівень

невизначеності в прийнятті рішень щодо розподілу ресурсів мікроенергосистем.

З точки зору керування, мікроенергосистема може гнучко розподіляти енергію між зовнішньою мережею, навантаженням з функцією керування споживання, місцевими генераторами ВДЕ, та системами накопичення енергії СНЕ. Система керування безперервно моніторить умови роботи та визначає оптимальний розподіл потужності між джерелами генерації (DG) і СНЕ, щоб забезпечити максимальну ефективність живлення критично важливих і контрольованих навантажень. Контрольовані навантаження регулюються з метою підтримки надійності системи та стабільного енергопостачання критичних об'єктів.

Функціонал системи керування мікроенергосистем охоплює оптимізацію роботи DG, управління попитом, інтеграцію з енергетичним ринком, використання відновлюваних джерел енергії, прогнозування навантаження, обслуговування кінцевих споживачів та управління СНЕ. З метою досягнення оптимального співвідношення розподілу потужності між генераторами та системами зберігання енергії, керування навантаженням та взаємодії з основною мережею, система керування використовує дані про прогнозоване навантаження, ресурси енергії, інформацію про споживачів та умови на ринку електроенергії.

3.4 Структура, особливості та механізми управління режимами функціонування мікроенергетичної системи з ВДЕ

Мікроенергетична система функціонує у двох основних режимах: режимі підключення до основної мережі та автономному (ізолюваному) режимі. Підключений режим, у свою чергу, має два підтипи: режим роботи з невідповідністю потужностей та узгоджений режим, де потужності обмінюються між мікроенергетичною та основною енергосистемою. У режимі невідповідності потужностей система може реагувати на коливання генерації

або попиту, тоді як в узгодженому режимі забезпечується баланс потужності, що підтримує стабільний обмін енергією з мережею.

У режимі несиметрії потужності, коли активна та реактивна потужність відрізняються від нуля ($\Delta P \neq 0$, $\Delta Q \neq 0$), між мікроенергосистемою і основною мережею відбувається перетік струму. Якщо $\Delta P > 0$, потужність надходить із зовнішньої мережі до мікроенергосистеми для покриття попиту, коли генерація ВДЕ є недостатньою. У випадку, коли $\Delta P < 0$, надлишкова енергія, згенерована у мікроенергосистемі, спрямовується в мережу після задоволення локального попиту, бо виробництво з ВДЕ перевищує потреби споживачів.

У режимі узгодженої потужності активна та реактивна потужності перебувають у стані балансу ($\Delta P = 0$, $\Delta Q = 0$). Це означає, що обсяг електроенергії, виробленої з ВДЕ, повністю задовольняє поточний попит навантаження, і обміну енергією між мікроенергосистемою та зовнішньою мережею не відбувається. Такий режим вважається найбільш економічним для роботи мікроенергосистеми оскільки дозволяє мінімізувати витрати на енергопостачання з основної мережі.

У разі, коли реактивна потужність має відхилення, тобто $\Delta Q < 0$ (надлишок) або $\Delta Q > 0$ (дефіцит), система переходить у режим неузгодженості реактивної потужності, що вимагає коригувальних дій для підтримання стабільності й оптимальної роботи.

Робота в режимі підключення з мережею передбачає, що мікроенергосистема залишається з'єднаною з основною енергосистемою крізь точку загального з'єднання, що дозволяє здійснювати обмін електроенергією з розподільчою мережею. У цьому режимі мікроенергосистема може взаємодіяти з мережею, компенсуючи нестачу або надлишок власної генерації, що підвищує гнучкість енергопостачання.

Завдяки елементам керування підключенням і відключенням мікроенергосистема може динамічно змінювати свій режим, переходячи з підключеного до ізольованого режиму за необхідності, наприклад, під час аварійних ситуацій у мережі або для зменшення витрат на електроенергію в

періоди високих тарифів. У режимі підключення до енергосистеми в точці загального підключення мікроенергосистема має можливість від'єднуватися від мережі за допомогою функції керування відключенням. Якщо вона працює автономно, її можна знову підключити до мережі, використовуючи функцію керування підключенням.

При виконанні відключення від мережі мікроенергосистема переходить із режиму підключення до мережі в автономний режим, забезпечуючи самостійне енергозабезпечення об'єктів. У режимі ж керування підключенням до мережі мікроенергосистема завершує ізолювану роботу й підключається до основної мережі, що дозволяє знову обмінюватися енергією з енергосистемою.

Незалежно від того, працює мікроенергосистема у підключеному режимі чи автономно, її роботу можна завершити повним відключенням за допомогою функції керування вимкненням, яка зупиняє усі енергетичні процеси мікроенергосистеми.

В ізолюваному режимі роботи мікроенергосистема функціонує автономно, будучи відключеною від основної енергосистеми через аварійні ситуації або заплановані відключення. У цьому режимі джерела ВДЕ, система накопичення енергії СНЕ, інші генератори та споживачі працюють незалежно, керуючись індивідуальними функціями управління.

Через можливий дефіцит електроенергії, характерний для цього режиму, мікроенергосистема може не завжди задовольняти весь попит на енергію. У таких випадках пріоритет надається критичним навантаженням, а менш важливі споживачі можуть відключатися для економії ресурсів. Управління відключенням навантажень у періоди дефіциту енергії дозволяє забезпечити стабільне енергопостачання для найбільш важливих споживачів і мінімізувати ризики переривання їхньої роботи.

Схема для проведення досліджень мікроенергетичної системи представлена на рис. 3.4.

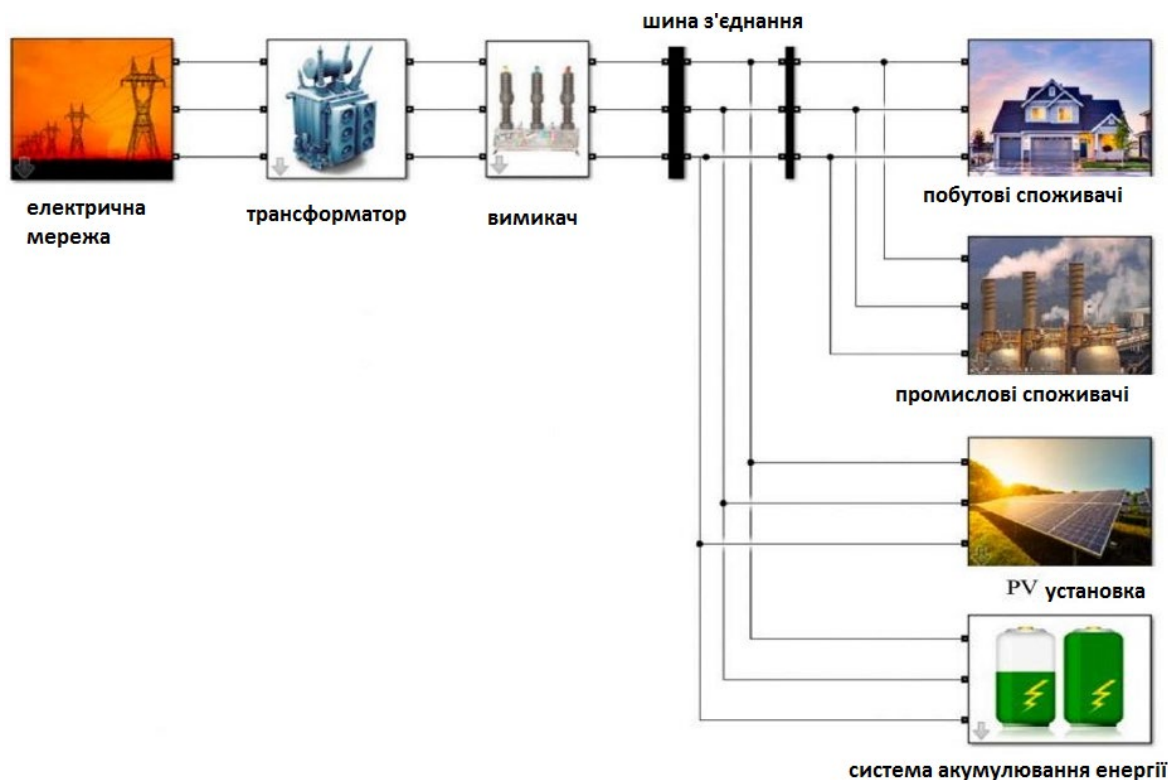


Рисунок 3.4 – Схема підключення елементів мікроенергосистеми

Електрична схема включає мережу, що має показники напруги 10 кВ і частоти 50 Гц. Ця мережа централізованого типу підключається до трифазного трансформатора з подвійною обмоткою, де вторинна обмотка розрахована на 0,4 кВ та виконана по схема зірки. Далі до схеми включено трифазний автоматичний вимикач, який може перебувати в двох положеннях (відкрите/замкнене), щоб забезпечити режим «острова». Цей вимикач з'єднано із змінним навантаженням для подачі живлення. Система навантаження включає змінну частину у 425 кВт для побутових споживачів та постійну складову у 150 кВт. В такому разі максимальне можливе навантаження на систему становить 575 кВт, тоді як мінімальне – 150 кВт.

Стандартна мікроенергосистема включає контрольовані та неконтрольовані (критичні) навантаження. Контрольовані навантаження – це ті, споживання яких можна регулювати у реальному часі залежно від заданих параметрів, що дозволяє гнучкіше реагувати на зміну умов в енергосистемі. У

традиційній системі розподілу електроенергії споживачі мають обмежену можливість для активної участі в ринках електроенергії. Керовані споживачі навантаження пов'язані з підходом регулювання попиту, що сприяє збалансуванню енергоспоживання та стабільності мережі. Окремий клас керованого навантаження представляють електромобілі з зарядкою від мережі; на відміну від інших видів навантаження, вони можуть підключатися в будь-якій локації та в будь-який момент, що додає профілю навантаження більшу непередбачуваність і динаміку.

У штатному режимі роботи вузли генерації та системи накопичення енергії можуть забезпечувати максимально можливу кількість критичних навантажень. Якщо ж мікроенергосистема переходить в автономний режим та від'єднується від центральної енергосистеми, деякі навантаження можуть залишитися без електропостачання. Для підвищення надійності та доступності електропостачання критичних навантажень, іноді виникає потреба у тимчасовому відключенні некритичних (тобто керованих) навантажень.

Фотоелектрична система включає 81 послідовно з'єднаних елементи, що дозволяє досягати максимальної потужності в 780 кВт. Контроль вихідної потужності цієї системи здійснюється в режимі реального часу шляхом застосування трекера відслідкування точки максимальної потужності (MPPT), що працює з перетворювачем постійного струму. Такий трекер дозволяє відстежувати оптимальну точку MPP, яка залежить від двох змінних зовнішнього середовища – рівня сонячної радіації та температури повітря. Ці фактори можуть змінюватися випадково, впливаючи на ефективність і продуктивність системи, тому налаштування на MPP допомагає отримувати максимальну доступну потужність.

Значення вихідної потужності масиву сонячних панелей визначається:

$$P_{PV} = A_{PV} \times \eta_{PV} \times \int_{t_0}^t I(t) \times f(t) \times dt \quad (3.1)$$

де: A_{PV} – площа поверхні фотопанелей, м^2 ; η_{PV} – ККД модуля фотоелектроперетворювача; I – годинне значення інтенсивності випромінювання Сонця, $\text{кВт}\cdot\text{год}/\text{м}^2$; $f(t)$ – густина випромінювання.

Система зберігання енергії розвиває номінальну потужність 410 кВт і має загальну ємність 3010 кВт-год. У випадку підключення до мережі фотоелектрична система налаштована на роботу при максимальній потужності для забезпечення найбільшої можливої кількості сонячної енергії в загальній системі. При такій конфігурації потужність, вироблена фотоелектричним генератором, іноді перевищує фактичний попит споживачів. Під час роботи в мережевому режимі акумулятор підтримується на рівні 50% заряду. У цьому випадку накопичувальна система може гнучко заряджатися або від фотоелектричного генератора, чи споживати енергію з мережі, залежно від потреб та стану мережі, що дозволяє ефективно балансувати енергоспоживання та покращувати стабільність роботи системи.

Розмір акумуляторної батареї визначається насамперед, адже такий елемент критично важливий складник мікроенергосистеми, і для забезпечення оптимальної надійності його потрібно точно підібрати. Окрім відповідності вимогам навантаження PV-батарея повинна одночасно забезпечувати заряджання акумулятора. Ідеально, якщо обидва процеси відбуваються паралельно, тому важливо спершу розрахувати розмір акумулятора, а вже після цього підбирати параметри фотоелектричної панелі.

Для відокремлення загальної мережі використовується трифазний вимикач. У режимі «острова» заряджання акумулятора можливе лише тоді, коли потужність, вироблена фотоелектричним модулем, перевищує потреби споживання. Такий підхід дозволяє забезпечити ефективне управління енергоресурсами в умовах обмеженої генерації, коли пріоритет надається задоволенню безпосереднього попиту, а надлишок спрямовується на накопичення.

3.5 Моделювання роботи мікроенергетичної системи з ВДЕ та оптимізацією використання системи накопичення енергії

Виконання дослідження режимів роботи реалізується за допомогою імітаційного моделювання у Matlab. Будуть досліджені наступні основні режими роботи енергосистеми, які описані нижче.

Режим А: Нічний режим, коли для забезпечення живлення споживачів використовується енергія від мережі. Оскільки сонячна енергія відсутня, PV-система не генерує електроенергію, і акумулятор не задіяний для роботи.

Режим В: Сонячна енергія є, але її недостатньо для повного забезпечення навантаження. У цьому випадку для додаткового живлення використовується заряд акумуляторної батареї (якщо її рівень заряду достатній) або енергія з основної мережі.

Режим С: Денний режим, коли генерація сонячної енергії перевищує потреби навантаження. Надлишкова енергія може бути спрямована на заряджання акумуляторної батареї, а якщо батарея повністю заряджена – відправляється в основну мережу.

Таке розподілення режимів дозволяє ефективно керувати енергопотоками, оптимізуючи використання сонячної енергії та зберігання енергії в акумуляторі, з метою досягнення енергетичної незалежності та зниження навантаження на мережу.

У режимі роботи, коли мікроенергосистема підключена до основної мережі, з'являється можливість як купівлі, так і продажу енергії залежно від поточних умов та енергетичного балансу. Щоб реалізувати цю функціональність в моделі і уникнути ситуацій, коли мікроенергосистема одночасно купує і продає енергію, у задачу оптимізації вводиться бінарна змінна. Ця змінна вказує режим роботи мікроенергосистеми: або покупка енергії з мережі, або її продаж.

У контексті оптимізації це дозволяє ефективно налаштовувати потоки енергії, знижуючи витрати або отримуючи дохід від продажу надлишкової

енергії. Бінарна змінна також сприяє усуненню конфліктів між режимами купівлі та продажу, що забезпечує стабільність і оптимальне використання ресурсів мікроенергосистеми при взаємодії з основною мережею.

Розподіл потужностей між генераторами був проаналізований відповідно до заданих добових графіків навантаження за допомогою засобів MATLAB. Модель досліджуваної системи зображена на рис. 3.5.

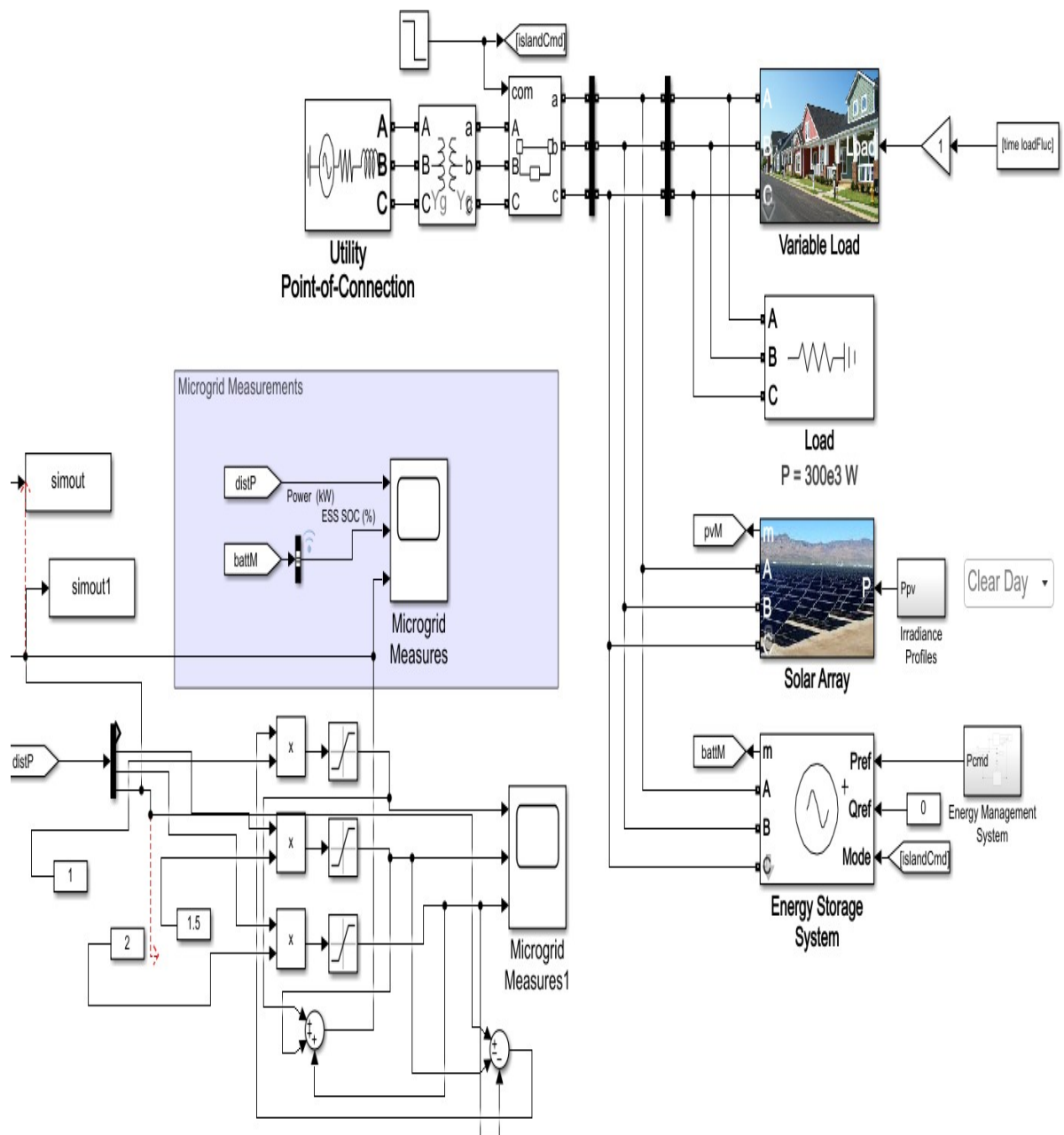


Рисунок 3.5 – Комп'ютерна модель мікроенергосистеми для досліджень

Для розрахунку загальної ціни C_{tot} для споживача встановлено відносні ціни на 1 кВт енергії для кожного типу генерації, використовуючи як базову величину вартість енергії, отриманої від сонячної батареї. Якщо енергія передавалася в основну мережу, її вартість для споживача рівна нулю. Табл. 3.1 містить прийняті для моделювання значення вартості 1 кВт енергії в умовних одиницях, де найнижча ціна була призначена для енергії, виробленої сонячною панеллю.

Такий підхід до встановлення цін дозволяє оптимально розподілити навантаження між генераторами, враховуючи економічні аспекти та мінімізуючи витрати на енергію для споживача, при цьому надаючи перевагу сонячній енергії.

$$C_{tot} = \sum_{i=1}^n P_{gi} C_{gi} \quad (3.2)$$

де P_{gi} – потужність i -го генератора;

C_{gi} – вартість енергії i -го генератора

n – число генераторів в системі.

Таблиця 3.1 – Вихідні параметри для визначення вартості електроенергії

Складові мікроенергосистеми	C	вартість складових C_{gi} , у.о.
Фотоелектростанція (PV)	C_{PV}	1
Мережа (Grid)	C_{Grid}	2
Система накопичення енергії)	C_{CHE}	1,5

Моделювання та розрахунки виконувалися в середовищі MATLAB, де інтервальна тривалість симуляції становила 86400 секунд, що відповідає повному добовому циклу. Модель дозволяє враховувати різні погодні умови: сонячний день, хмарну погоду та дощовий день, що впливає на генерацію сонячної енергії.

Дослідження охоплювали аналіз трьох різних графіків навантаження для мікроенергосистеми як з акумуляторною батареєю, так і без неї. Це дозволяє детально оцінити, як накопичувальна система впливає на здатність мікромережі адаптуватися до змін попиту та умов генерації. Зміна погодних умов і сценарії навантаження надають можливість оцінити ефективність роботи мікроенергосистеми у різних експлуатаційних умовах та дослідити її гнучкість при коливаннях генерації й навантаження.

Моделювання для сонячної погоди. Для всіх трьох графіків навантаження було досліджено роботу системи при умовах сонячної погоди, де потужність, вироблювана сонячною установкою, має неперервний характер протягом дня. Для графіків навантаження I та II результати імітаційного моделювання представлені на рис. 3.6-3.9.

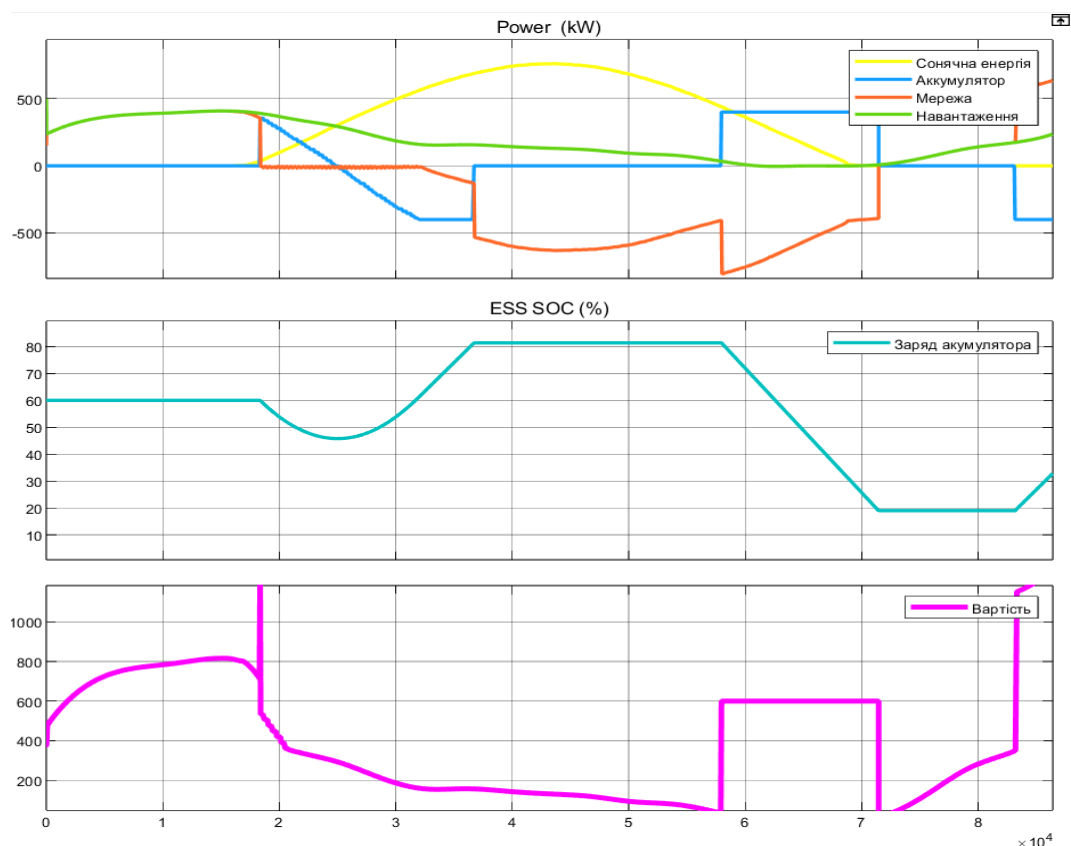


Рисунок 3.6 – Результати комп'ютерного моделювання роботи мікроенергосистеми (сонячна погода, тип графіка навантаження I)

Рис. 3.6 містить добовий графік навантаження з розподілом потужності по генераторам, а також відображає роботу акумуляторної батареї. На графіках продемонстровані всі можливі режими роботи, описані раніше, включаючи режими, коли сонячної енергії недостатньо для покриття навантаження, надлишок сонячної енергії спрямовується на заряд акумулятора, або надлишкова енергія передається в мережу. Таке моделювання дозволяє оцінити, як акумуляторна батарея допомагає компенсувати нестачу енергії в пікові години навантаження, і забезпечує ефективне використання сонячної генерації в різних режимах роботи системи.

На початку доби, в нічні та ранкові періоди, коли сонячна енергія ще не виробляється, і акумулятор недостатньо заряджений, енергія для покриття навантаження береться з основної мережі. По мірі того як з'являється енергія від сонячних панелей, вона спочатку покриває потреби навантаження, а потім, якщо потужності сонячної батареї достатньо, заряджає акумулятор. У випадку, коли акумулятор повністю заряджений і сонячна енергія перевищує потреби навантаження, надлишок енергії може бути відправлений в мережу.

Розрахунок вартості енергії для споживача здійснюється за допомогою виразу (3.2), що враховує різні тарифи для енергії, отриманої з різних джерел (сонячної генерації, мережі, батареї). Результати цього розрахунку відображені на графіках рис. 3.7, які показують зміни вартості енергії протягом доби та розподілу енергопостачання між мережами та генерацією.

На рис. 3.7 показана вартість електроенергії, отриманої від кожного елемента локальної енергосистеми окремо: сонячної панелі, системи акумуляування, мережі. При визначенні вартості для кожного джерела енергії враховувалась лише енергія, яка йде безпосередньо в навантаження. Енергія, що передається в мережу або використовується для заряджання акумулятора, не бралася до уваги при обчисленні вартості.

Рисунки 3.8-3.9 відображають графіки для іншого варіанту графіка потужності навантаження, що показує зміни в залежності від навантаження та генерації в різні моменти часу. Рис. 3.9 містять розподіл вартості енергії по

різних генераторах, що дає змогу оцінити, як змінюється вартість енергопостачання в залежності від типу джерела енергії і часу доби.

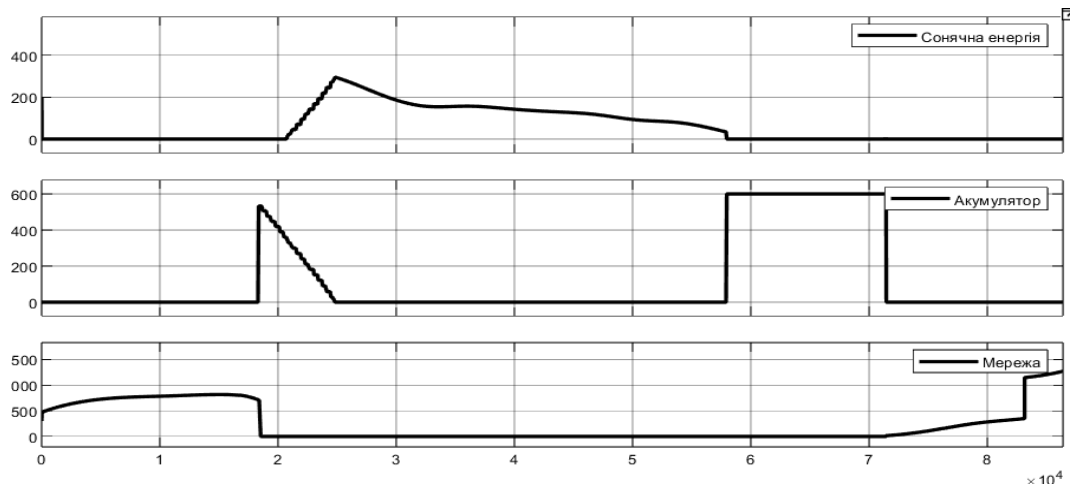


Рисунок 3.7 – Графіки зміни вартості енергії генераторів мікроенергосистеми за типами (сонячна погода, типу графіка навантаження I)

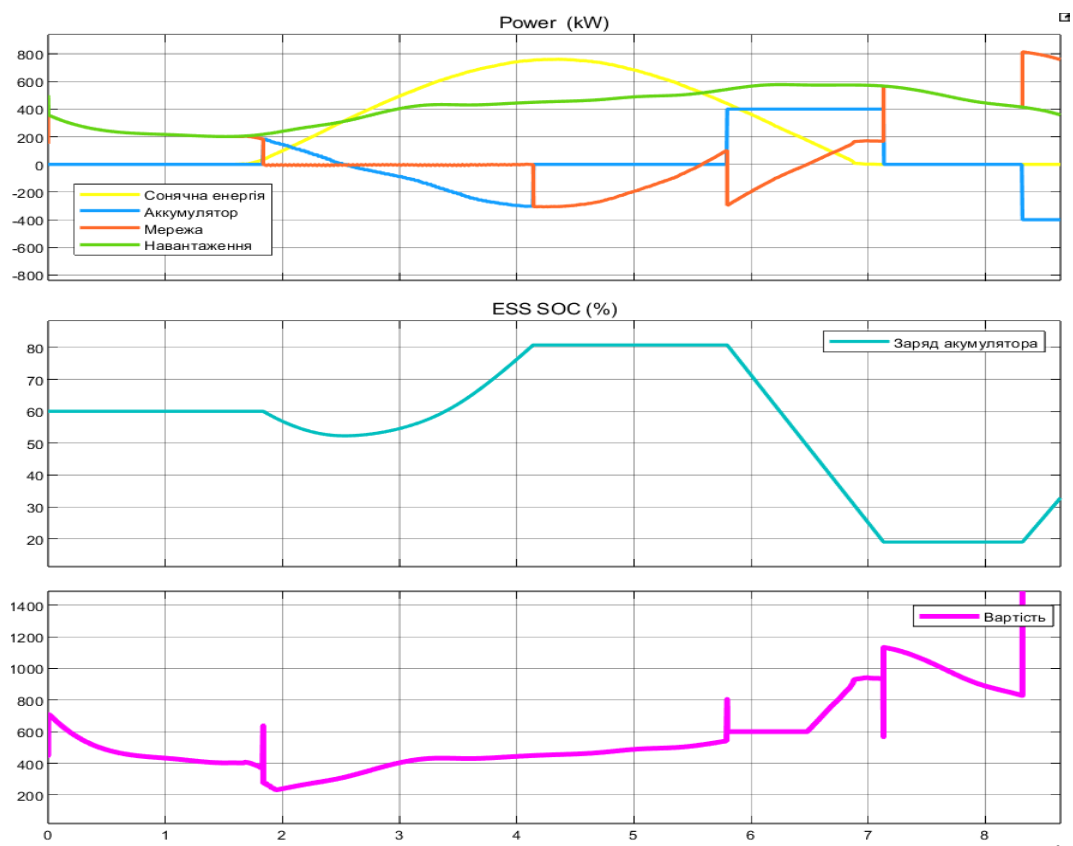


Рисунок 3.8 – Результати комп'ютерного моделювання роботи мікроенергосистеми (сонячна погода, тип графіка навантаження II)

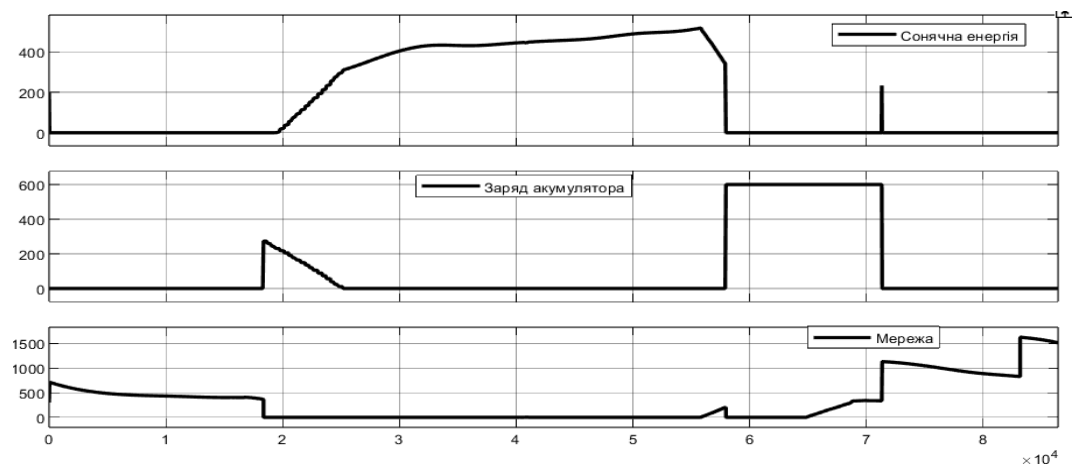


Рисунок 3.9 – Графіки зміни вартості енергії генераторів мікроенергосистеми за типами (сонячна погода, тип графіка навантаження II)

Ці графіки дозволяють глибше аналізувати економічну ефективність роботи кожного елемента системи та допомагають оптимізувати витрати на енергію в залежності від її виробництва та споживання.

Моделювання для хмарної погоди. Для умов хмарної погоди також було проведене моделювання роботи мікроенергетичної системи. Графік електричної потужності сонячної установкою приведений на рис. 3.10.

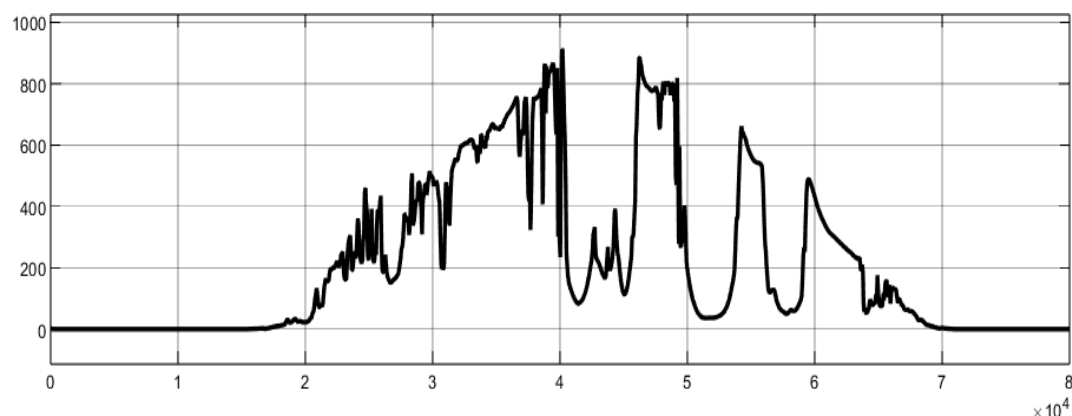


Рисунок 3.10 – Генерація потужності фотоустановки при хмарній погоді

Потужність сонячної установки змінюється через її переривчастий характер, що призводить до коливань у розподілі потужності серед генераторів. На рис. 3.11-3.14 представлені результати моделювання для

графіків навантаження, розглянутих в попередньому підрозділі при сонячних умовах.

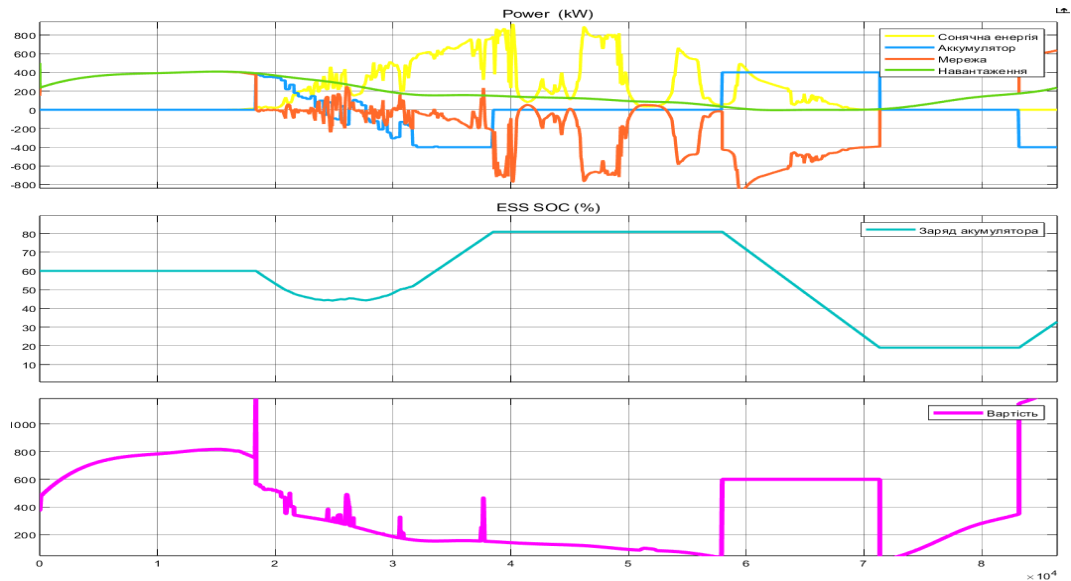


Рисунок 3.11 – Результати комп’ютерного моделювання роботи мікроенергосистеми (хмарна погода, тип графіка навантаження І)

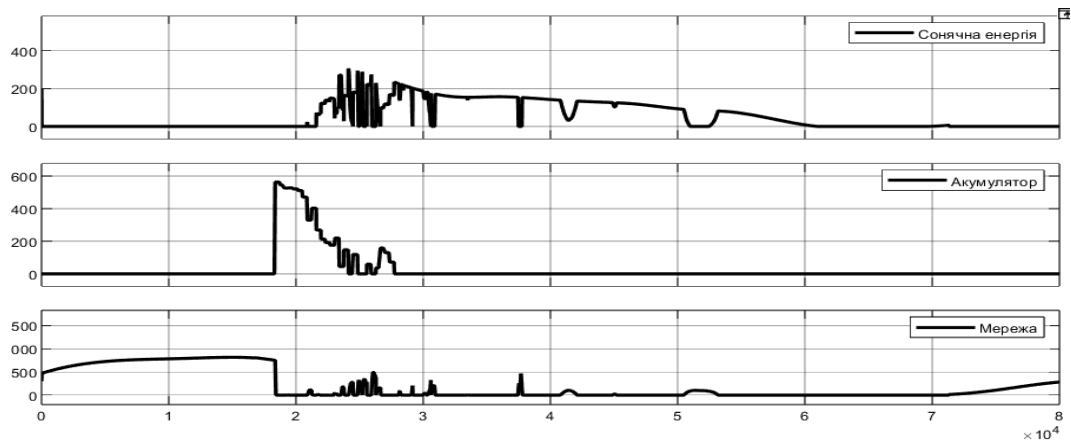


Рисунок 3.12 – Графіки зміни вартості енергії генераторів мікроенергосистеми за типами (хмарна погода, тип графіка навантаження І)

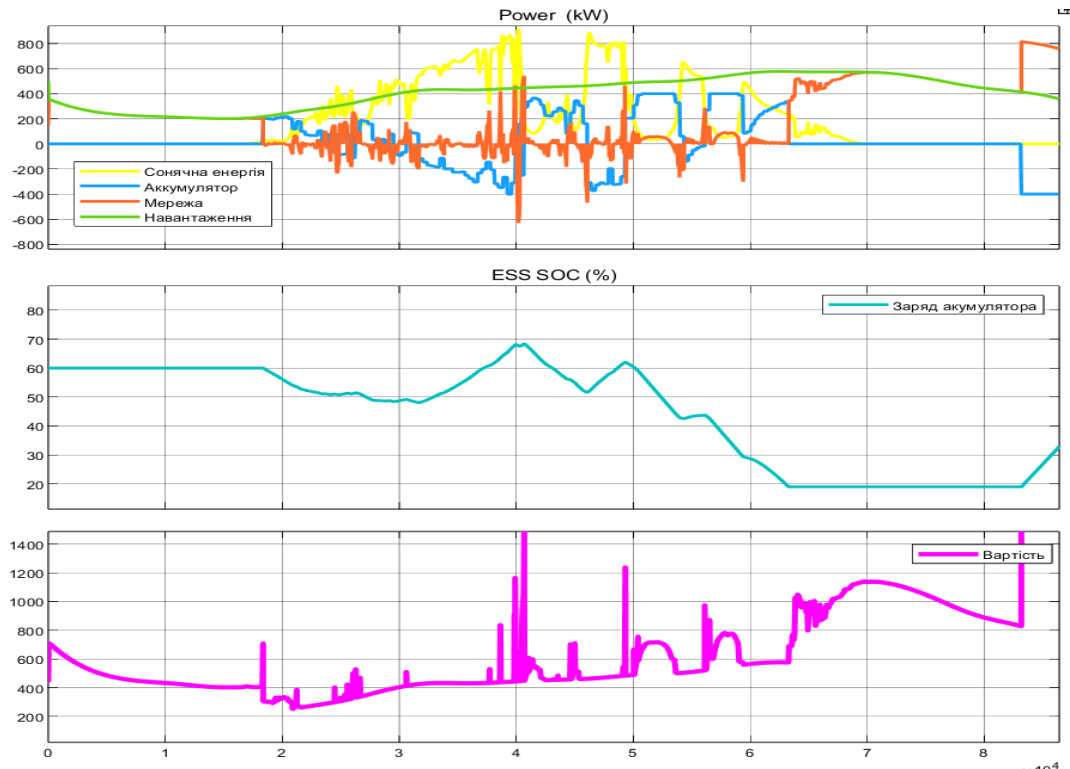


Рисунок 3.13 – Результати комп’ютерного моделювання роботи мікроенергосистеми (хмарна погода, тип графіка навантаження II)

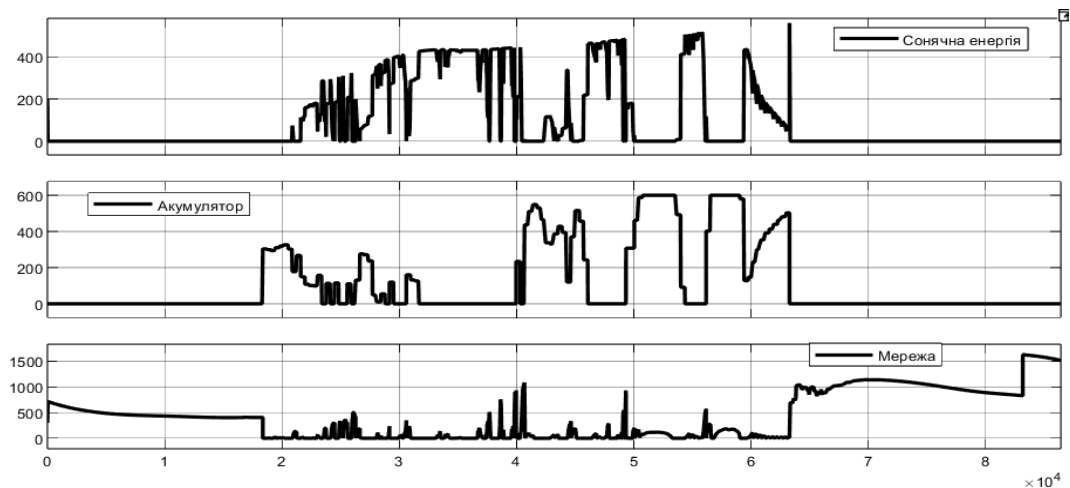


Рисунок 3.14 – Графіки зміни вартості енергії генераторів мікроенергосистеми за типами (хмарна погода, тип графіка навантаження II)

Моделювання для сонячної та хмарної погоди без системи накопичення енергії. Порівняння результатів для систем із акумуляванням енергії та без нього за умов сонячної та хмарної погоди (відповідно до даних,

представлених на рис. 3.15-3.22) демонструє, що наявність акумуляторної батареї суттєво впливає на загальну ефективність системи.

Для системи без акумуляторів за сонячної погоди значна частина виробленої енергії втрачається через обмежену можливість зберігання надлишкової генерації. У хмарні дні така система значною мірою залежить від зовнішньої мережі для покриття попиту, що призводить до збільшення вартості енергоспоживання через необхідність купівлі енергії по високим тарифам. Натомість система з акумулятором здатна зберігати надлишкову енергію, вироблену під час пікової генерації в сонячні години, і використовувати її у хмарну погоду або під час високих тарифів. Це дозволяє оптимізувати використання відновлюваної енергії, знижуючи залежність від мережі та витрати на енергію.

Результати, представлені у зазначених графіках, підтверджують, що інтеграція систем акумулювання забезпечує не лише економічні переваги, але й підвищує стабільність та адаптивність мікроенергосистем до змінних умов енергопостачання та споживання.

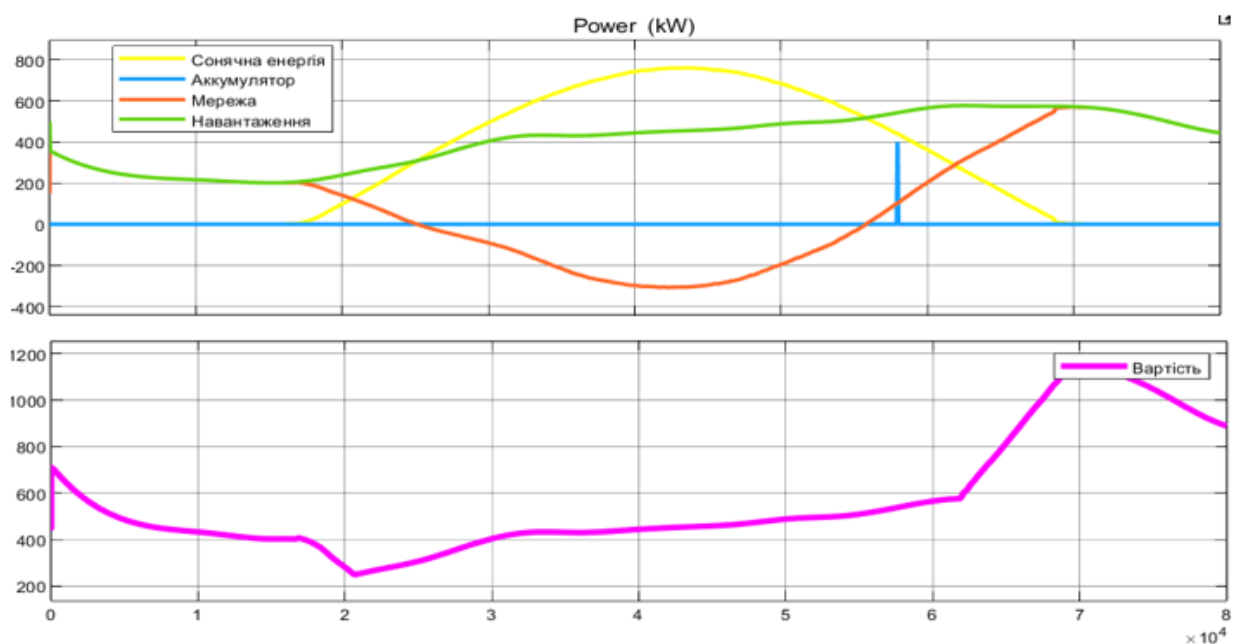


Рисунок 3.15 – Результати моделювання роботи мікроенергосистеми без СНЕ (сонячна погода, тип графіка навантаження II)

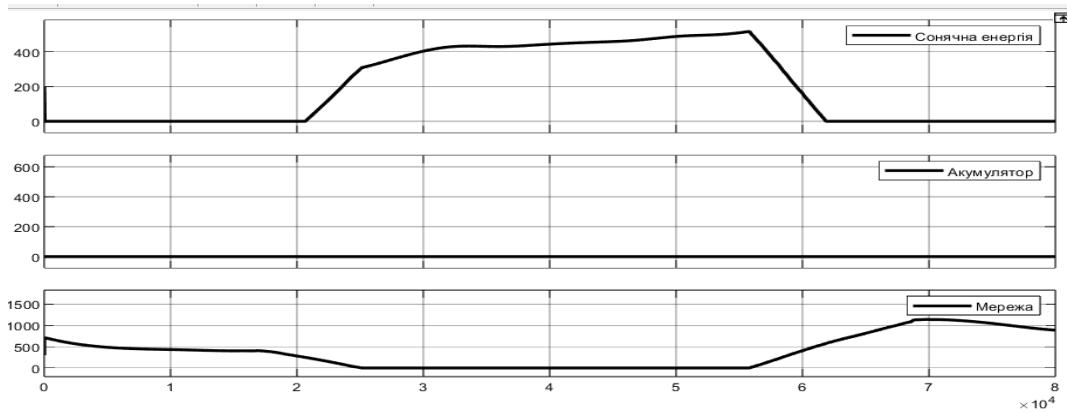


Рисунок 3.16 – Графіки зміни вартості енергії генераторів мікроенергосистеми без СНЕ за типами (сонячна погода, тип графіка навантаження II)

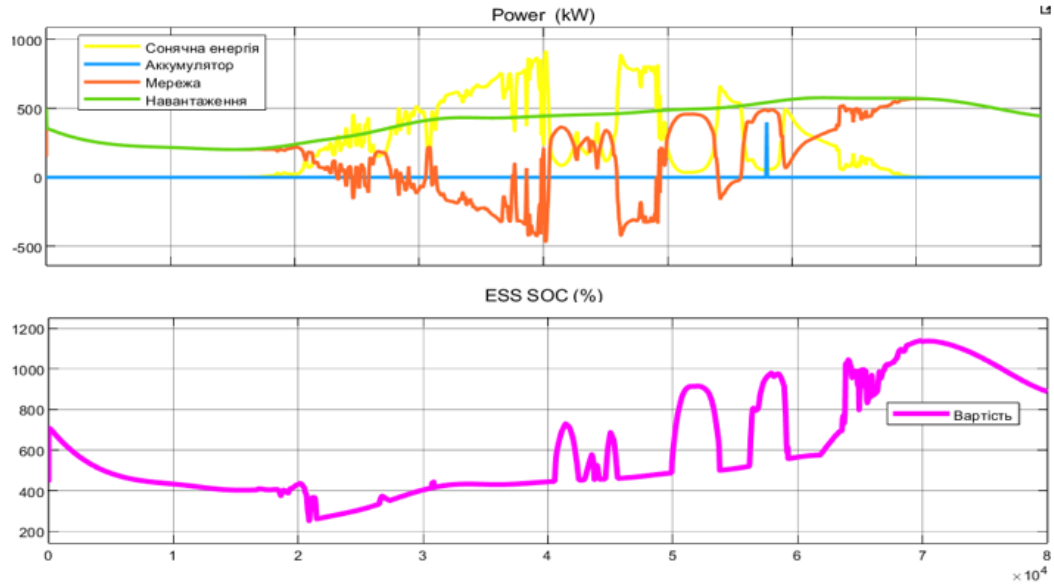


Рисунок 3.17 – Результати моделювання роботи мікроенергосистеми без СНЕ (хмарна погода, тип графіка навантаження II)

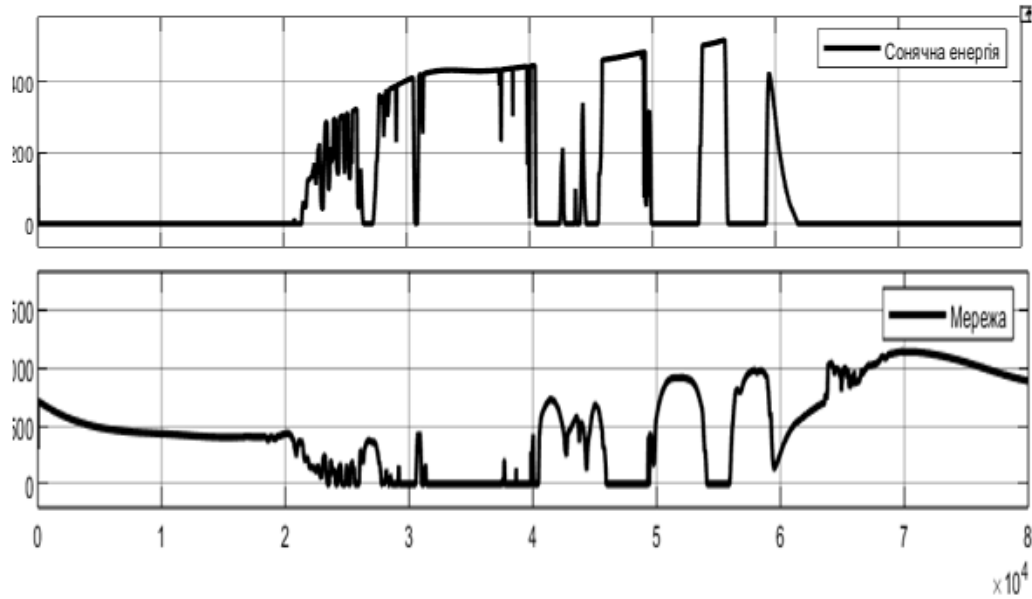


Рисунок 3.18 – Графіки зміни вартості енергії генераторів мікроенергосистеми без СНЕ за типами (хмарна погода, тип графіка навантаження II)

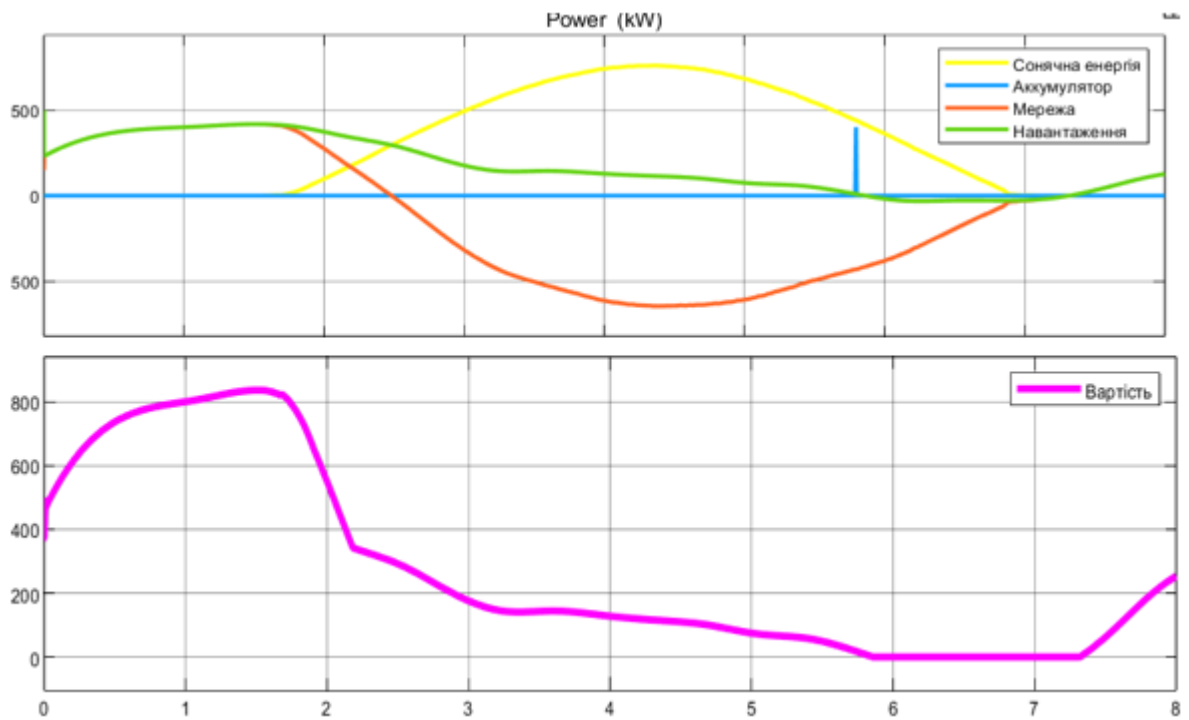


Рисунок 3.19 – Результати моделювання роботи мікроенергосистеми без СНЕ (сонячна погода, тип графіка навантаження I)

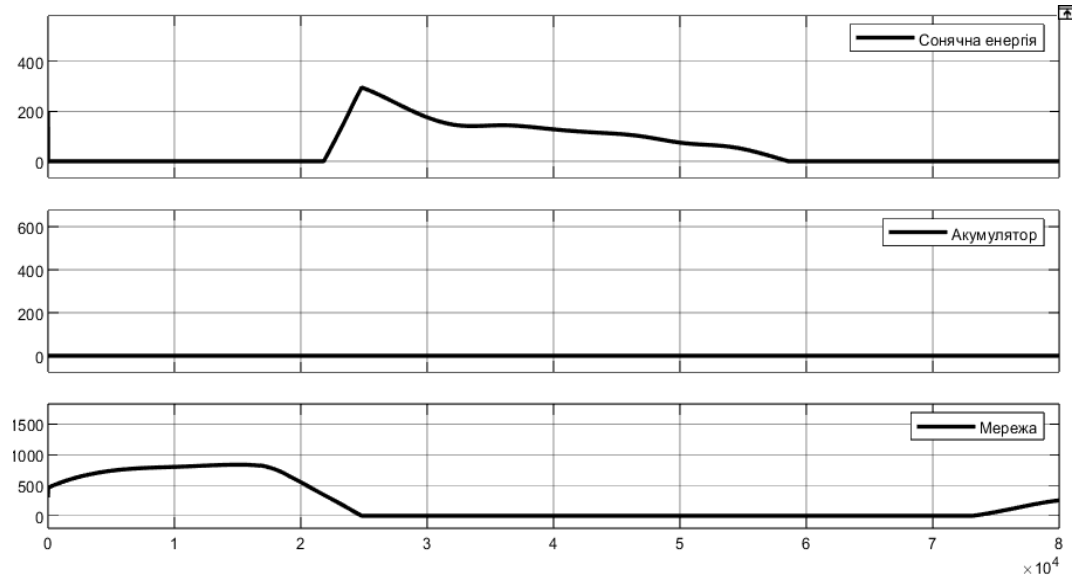


Рисунок 3.20 – Графіки зміни вартості енергії генераторів мікроенергосистеми без СНЕ за типами (сонячна погода, тип графіка навантаження I)

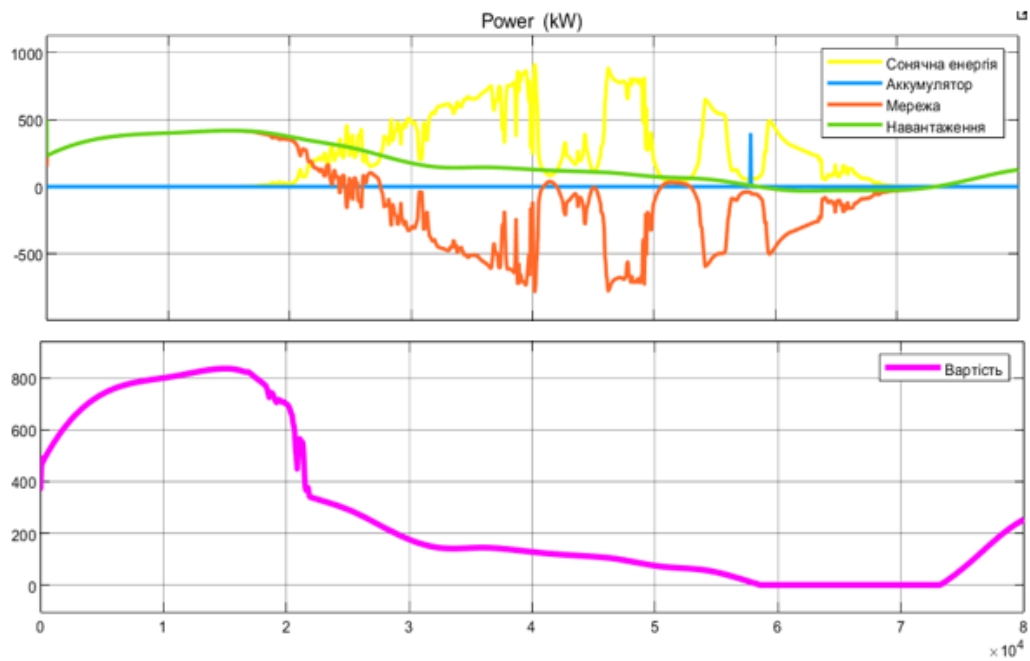


Рисунок 3.21 – Результати комп'ютерного моделювання роботи мікроенергосистеми без СНЕ (хмарна погода, тип графіка навантаження I)

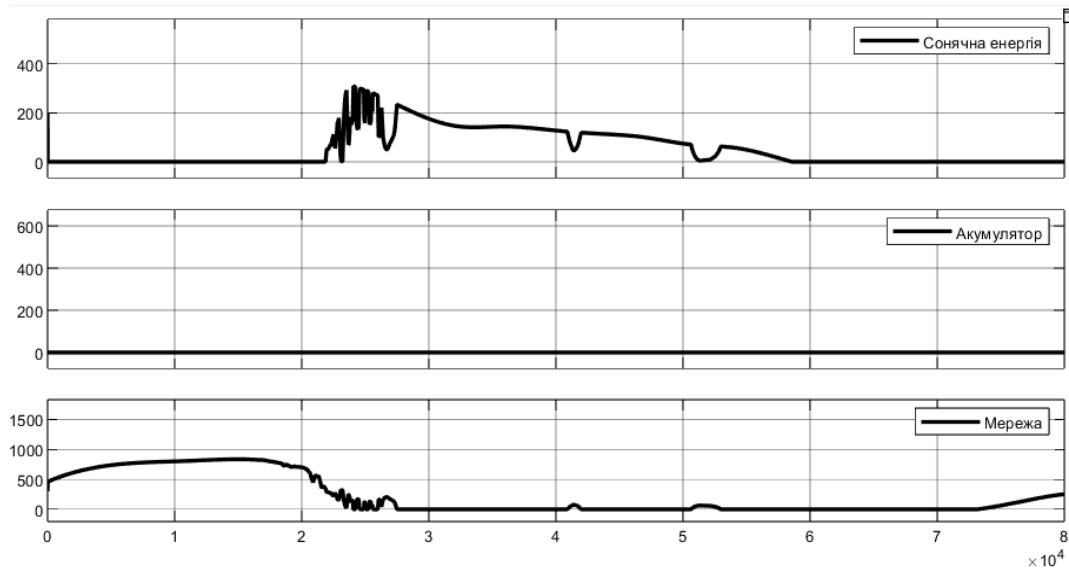


Рисунок 3.22 – Графіки зміни вартості енергії генераторів мікроенергосистеми без СНЕ за типами (хмарна погода, тип графіка навантаження І)

3.6 Порівняння результатів моделювання режимів роботи мікроенергетичної системи

Результати досліджень для різних графіків розподілу потужності наведено в табл. 3.2.

Величину відсоткового змінення вартості, $C\%$, розраховано за допомогою наступного виразу:

$$C\% = \frac{C_{-ak} - C_{+ak}}{C_{+ak}} 100\% \quad (3.1)$$

де C_{+ak} – це добова вартість електроенергії у мікромережі з використанням системи акумулювання енергії, а C_{-ak} – добова вартість електроенергії у мікромережі без системи акумулювання енергії у кВт·год.

Результати моделювання для графіка навантаження ІІІ показують подібну тенденцію до графіків навантаження І та ІІ. Окремо графік

навантаження III представлено на рис. 3.23.



Рисунок 3.23 – Графік зміни потужності навантаження типу III

Реалізована модель MATLAB для розрахунку представлена на рис. 3.24.

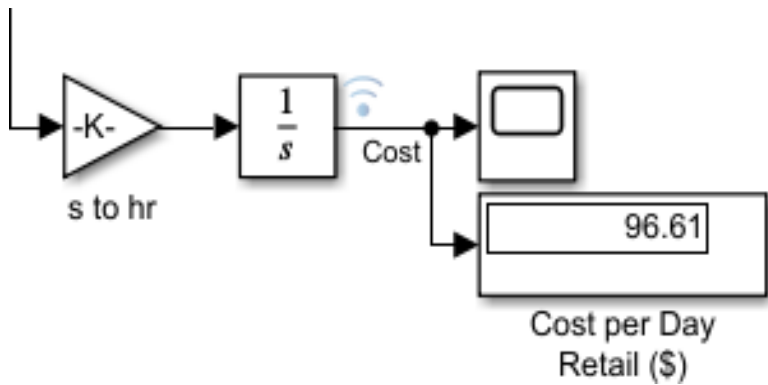


Рисунок 3.24 – Модель MATLAB для розрахунку вартості Microgrid

Таблиця 3.2 – Зведені результати моделюванняРезультати порівняння

	Наявна система акумуляування		Відсутня система акумуляування		Зміна вартості	
	сонце	хмари	сонце	хмари	сонце	хмари
Графік I	61,60	64,0	62,75	66,7	1,80	4,0
Графік II	115,40	126,90	124,0	135,0	7,0	6,0
Графік III	102,60	104,90	108,0	116,0	5,0	9,50

Для всіх аналізованих графіків навантаження використання акумуляторної батареї забезпечує економію витрат у межах від 1,8% до 10%.

У випадках із хмарною погодою витрати зростають, оскільки надходження дешевої сонячної енергії зменшується, що призводить до збільшення залежності від більш дорогих джерел енергії.

Висновки до третього розділу

Для досягнення максимальної економічної та технічної ефективності інтегрованих у мікроенергетичні системи генераторів та систем зберігання енергії, необхідно забезпечити їхню скоординовану роботу, що досягається за допомогою системи керування енергією. Ця система керування – це програмний комплекс, здатний ефективно управляти потужністю джерел розподіленої генерації, живити навантаження мікроенергетичної системи з економічної точки зору та підтримувати роботу мережі як у централізованому, так і в децентралізованому режимах. Обов'язковим компонентом мікроенергетичної системи є акумуляторна батарея, оптимізація стану якої є критично важливою для ефективної роботи.

Дослідження режимів експлуатації мікроенергетичної системи реалізовано шляхом використання імітаційного моделювання в Matlab. Для аналізу обрана схема, що включає мережу, сонячні панелі (фотоелектростанцію), акумуляторні батареї (систему акумуляування) та навантаження. Було змодельовано роботу системи для трьох типів добового графіка навантаження, що різняться споживанням та формою за умов сонячної погода та хмарності, отримані графіки миттєвих витрат на електроенергію, а також проведено порівняння з системою без акумуляції енергії. Виявлено, що використання системи акумуляторного накопичення енергії дозволяє зменшити витрати на електроенергію на 2-10% залежно від умов експлуатації та погодних умов.

РОЗДІЛ 4

ОХОРОНА ПРАЦІ

4.1 Дотримання заходів безпеки в процесі монтажу електроустановок мікроенергетичних систем

Заходи безпеки при монтажі електроустановок мікроенергетичних систем поділяються на три категорії:

- 1) роботи зі зняттям напруги;
- 2) роботи без зняття напруги на струмоведучих частинах і поблизу них;
- 3) роботи без зняття напруги не на струмоведучих частинах, які знаходяться під напругою.

За умови одночасних робіт в електроустановках мікроенергетичних систем напругою до і понад 1кВ категорії робіт вважаються як для установок понад 1кВ.

До робіт, які проводяться зі зняттям напруги при монтажі, належать такі види робіт в електроустановці (або її частині), зі струмоведучих частин якої знято напругу і доступ до частин, що знаходяться під напругою, унеможливлений.

До робіт без зняття напруги на струмоведучих частинах та поблизу них при монтажі мікроенергетичних систем належать роботи, що безпосередньо проводяться на цих частинах. Такі роботи мають виконуватися не менше ніж двома працівниками, з яких особа що керує роботами повинен мати групу IV, а інші - групу III.

В електроустановках мікроенергетичних систем напругою понад 1 кВ роботи без зняття напруги на струмоведучих частинах чи поблизу них слід проводити із застосуванням спеціальних засобів захисту для відсторонення працівника від струмоведучих частин або від землі. За умови відсторонення

працівника від землі роботи виконуються згідно спеціальних інструкцій чи технологічних карт, де передбачено необхідні заходи безпеки при монтажі.

В процесі виконання монтажних робіт в діючих електроустановках мікроенергетичних систем напругою до 1 кВ без зняття напруги на струмоведучих частинах або поблизу них необхідно:

- захистити розташовані поруч з робочим місцем інші струмоведучі частини під напругою, до яких можливий випадковий дотик;
- працювати у діелектричному взутті, стоячи на ізолювальних підставках чи діелектричному килимку;
- використовувати інструмент з ізолювальними рукоятками (у викруток додатково має бути ізольований стрижень); за відсутності зазначеного інструменту слід застосовувати діелектричні рукавички.

В процесі виконання монтажних робіт без зняття напруги на струмоведучих частинах з використанням ізолювальних засобів захисту потрібно:

- тримати ізолювальні складові засобів захисту за тримачі до обмежувального кільця;
- утримувати ізолювальні частини так, щоб уникнути небезпеки перекриття ізоляції між фазами або замикання на землю;
- використовувати лише сухі та чисті ізолювальні частини із неущкодженням лаковим покриттям.

У разі виявлення пошкоджень лакового покриття або несправностей іншого роду ізолювальних частин захисних засобів користування ними забороняється. Під час роботи із застосуванням засобів електрозахисту при монтажі допускається наближення працівника до струмоведучих частин на відстань, яка дозволяється довжиною ізолювальної частини цих засобів.

Усі працівники, які перебувають у приміщеннях з діючим електрообладнанням мікроенергетичних систем (окрім щитів керування), у закритих розподільних пристроях, відкритих розподільних пристроях, колодязях, тунелях і траншеях, повинні використовувати захисні каски.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

1. Кваліфікаційна робота присвячена вивченню функціонування мікроенергетичних систем із застосуванням систем зберігання енергії (АСНЕ). Такі системи зберігають надлишкову енергію, вироблену в мережі, для подальшого використання в моменти, коли інші джерела енергії недоступні, є економічно не вигідними або коли раптово виникає необхідність у додатковій потужності. Основними цілями мікроенергетичних систем є підтримка високого рівня інтеграції розподілених генераторів без погіршення показників якості електроенергії в мережі розподілу, а також надійного електрозабезпечення споживачів.

Системи зберігання енергії є важливими компонентами мікроенергетичних систем, оскільки вони допомагають стабілізувати енергопостачання, компенсувати коливання в генерації та покращують енергетичну безпеку, знижуючи залежність від основної мережі та підвищуючи ефективність використання енергії.

2. У роботі розглянуто питання побудови та методів оптимізації мікроенергетичних систем з точки зору технічних та економічних показників. Для досягнення максимальних економічних і технічних переваг включені в мікроенергетичні системи установки генерації та системи накопичення енергії потребують скоординованого управління. Ця координація здійснюється за допомогою системи керування енергією, яка оптимізує розподіл ресурсів, забезпечує надійне енергопостачання навантажень і дозволяє мікроенергетичним системам працювати в централізованому або децентралізованому режимах.

Система керування використовує прогностичне управління для досягнення найкращого використання ресурсів у мікроенергетичних системах, зокрема для управління заряджанням і розряджанням акумуляторних батарей,

а також для балансування генерації та споживання, що дозволяє мінімізувати витрати та підвищити стійкість системи.

3. У ході дослідження було проведено імітаційне моделювання режимів роботи локальної системи енергозабезпечення за допомогою програмного середовища Matlab. Для моделювання було обрано схему, що включає централізовану мережу, сонячні панелі, акумуляторну батарею та навантаження. Така схема дозволяє аналізувати, як інтегровані в Microgrid елементи, зокрема системи зберігання енергії, сприяють забезпеченню стабільності та економічної ефективності енергозабезпечення. Модель дозволяє оцінити роботу системи в умовах змінного навантаження та різних погодних умов, а також перевірити, як наявність акумулятора впливає на витрати і загальну ефективність системи.

4. У рамках роботи було розраховано базову вартість електроенергії для споживача без урахування режимів заряджання акумуляторної батареї та продажу надлишкової енергії в мережу. Також була розроблена модель для обчислення цієї вартості, яка дозволяє оцінити основні витрати в умовах відсутності активного управління енергоресурсами. Такий підхід є необхідним для подальшого порівняння та аналізу економічної вигоди від впровадження систем керування заряджанням, розряджанням та продажем енергії в мікроенергетичній системі.

5. Аналіз добових графіків навантаження для системи з акумулятором та без нього під час сонячної і хмарної погоди продемонстрував суттєву економічну перевагу використання накопичувачів енергії. Встановлено, що наявність акумуляторної батареї дозволяє зменшити вартість енергоспоживання на 2-10%, залежно від режимів роботи системи та поточних погодних умов.

Крім того, використання накопичувачів підвищує гнучкість системи, сприяє стабілізації напруги та забезпечує резерв енергії для критичних навантажень, що особливо важливо у випадках зміни погодних умов або нерівномірного розподілу сонячного випромінювання протягом дня.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Енергетична стратегія України на період до 2035 року «Безпека, енергоефективність, конкурентоспроможність» Режим доступу: <http://zakon.rada.gov.ua/laws/file/text/58/f469391n10.pdf>
2. Закон України «Про електроенергетику». Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/575/97-%D0%B2%D1%80>
3. Державне агенство з енергоефективності та енергозбереження України. Офіційний сайт. Режим доступу: <http://saee.gov.ua/uk/news/2450>
4. Twidell J., Weir T. Renewable Energy Resources ED2. – New York, Taylor & Francis, 2012. – 601 P.
5. Нетрадиційні та відновлювані джерела енергії: підручник / С.О. Кудря. – К.: НТУУ «КПІ», 2012. – 492 с.
6. Щербина О. Енергія для всіх. Технічний довідник з енергоощадності та відновлюваних джерел енергії. – Ужгород, 2007. – 336 с.
7. Blaabjerg F. Overview of Control and Grid Synchronization for Distributed Power Generation Systems / F. Blaabjerg, R. Teodorescu, M. Liserre, A.V. Timbus // IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol.53, no.5, pp.1398-1409, Oct. 2006.
8. Blaabjerg F. Power electronics as an enabling technology for renewable energy integration / F. Blaabjerg and Z. Chen // J. Power Electron., vol. 3, no. 2, pp. 81–89, Apr. 2003
9. Blaabjerg F. Power electronics as efficient interface in dispersed power generation systems / F. Blaabjerg F, Z. Chen, S. Kjaer // IEEE Trans. Power Electron., vol. 19, no. 5, pp. 1184–1194, Sep. 2004
10. Blaabjerg F., Liserre M., Ma K. Power Electronics Converters for Wind Turbine Systems / F. Blaabjerg, M. Liserre, K. Ma // IEEE Transactions on Industry Applications. – 2012. – Vol. 48. – No.2. – P. 708–719.
11. Вибір системи електропостачання з відновлювальними джерелами /

Т.Г. Сабірзянов, П.Г. Плєшков, М.В. Кубкін, В.П. Солдатенко / // Вісник ХНТУСГ ім. П. Василенка. Технічні науки. Вип. 117. «Проблеми енергозабезпечення та енергозбереження в АПК України» – Харків: ХНТУСГ, 2011 – С. 17–19.

12. Математична модель фотобатареї як джерела електричної енергії / Т. Г. Сабірзянов, М.В. Кубкін, В.П. Солдатенко, О.А. Козловський // Збірник наукових праць Кіровоградського національного технічного університету. Техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація. – Кіровоград: КНТУ, 2012. – Вип. 25, ч. 1. – С. 331-335.

13. Duffie J. Solar engineering of thermal processes / J. Duffie, W. Beckman. – John Wiley & Sons, Inc, New York – 1980.

14. Т.Г. Сабірзянов, проф., д-р техн. наук, О.І. Сіріков, доц., канд. Техн. наук, М.В. Кубкін, асист., В.П. Солдатенко, асист. //Алгоритм визначення густини потоку сонячного випромінювання на довільно-орієнтовану поверхню. Техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація., 2012, вип. 25, ч.І, стр. 303-312;

15. НПАОП 40.1-1.21-98. «Правила безпечної експлуатації електроустановок споживачів». К.: Державний комітет України з нагляду за охороною праці, 1998. – 180 с.;

16. K. Nara, Y. Hayashi, K. Ikeda, and T. Ashizawa, "Application of tabu search to optimal placement of distributed generators," in Proc. 2001 IEEE Power Engineering Society Winter Meeting, pp. 918-923.

17. T. K. A. Rahman, S. R. A. Rahim, and I. Musirin, "Optimal allocation and sizing of embedded generators," in Proc. 2004 National Power and Energy Conference, pp.288-294.

18. G. Celli, and F. Pilo, "Optimal distributed generation allocation in MV distribution networks," in Proc. 2001 IEEE PICA Conference, pp. 81-86.

19. W. El-Khattam, K. Bhattacharya, Y. Hegazy, and M. M. A. Salama, "Optimal investment planning for distributed generation in a competitive electricity market," IEEE Trans. Power Systems, vol. 19, pp. 1674-1684, Aug. 2004.

20. W. El-Khattam, Y. G. Hegazy, and M. M. A. Salama, "An integrated distributed generation optimization model for distribution system planning," *IEEE Trans. Power Systems*, vol. 20, pp. 1158-1165, May 2005.
21. M. Gandomkar, M. Vakilian, M. Ehsan, "A combination of genetic algorithm and simulated annealing for optimal DG allocation in distribution networks", *CCECE/CCGEI, Saskatoon, May 2005 IEEE*, PP.645-648.
22. A. Keane, and M. O'Malley, "Optimal allocation of embedded generation on distribution networks," *IEEE Trans. Power Systems*, vol. 20, pp. 1640-1646, Aug. 2005.
23. Distributed generation: a definition; Thomas Ackermann, Göran Andersson, Lennart Söder; *Electric Power Systems Research* 57 (2001) 195–204; December 2000.
24. Tucho, G.T., Weesie, P.D.M., Nonhebel, S., 2014. Assessment of renewable energy resources potential for large scale and standalone applications in Ethiopia. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 40, 422–431.
25. Mozina, C.J., 2008. A tutorial on the impact of distributed generation (DG) on distribution systems. In: 2008 61st Annu. Conf. Prot. Relay Eng. pp. 591–609.