МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

ЗАПОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІНЖЕНЕРНИЙ НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ ІМЕНІ Ю.М.ПОТЕБНІ
КАФЕДРА ЕЛЕКТРИЧНОЇ ІНЖЕНЕРІЇ ТА КІБЕРФІЗИЧНИХ СИСТЕМ

«до захисту допущено»

Завідувач кафедри ЕІКФС

ІННІ ЗНУ

Коваленко В. Л.

27 лютого 2025 р.

Кваліфікаційна робота

на здобуття ступеня магістра

зі спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

на тему: «Дослідження ефективності роботи автономних систем енергопостачання в різних умовах»

Виконав:

Студент ІІ курсу, групи 8.1414-дн

Рибак Олександр Володимирович

Керівник:

к.т.н., доцент

Башлій Сергій Вікторович _____

Рецензент:

Коломієць Дмитро Миколайович _____

Запоріжжя 2025

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

ЗАПОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІНЖЕНЕРНИЙ НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ ІМЕНІ Ю.М.ПОТЕБНІ
КАФЕДРА ЕЛЕКТРИЧНОЇ ІНЖЕНЕРІЇ ТА КІБЕРФІЗИЧНИХ СИСТЕМ

Рівень вищої освіти – другий (магістр)
Спеціальність – 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»
Освітньо-професійна програма «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри ЕІКФС ІННІ ЗНУ Коваленко В.Л.
27 лютого 2025 р.

ЗАВДАННЯ
на дипломний проект студенту
Рибаку Олександру Володимировичу

1. Тема проекту «Дослідження ефективності роботи автономних систем енергопостачання в різних умовах»

Науковий керівник роботи Башлій Сергій Вікторович, доцент, к.т.н.

Затверджені наказом по університету №2215-с від «27» лютого 2025 р.

2. Строк подання студентом роботи: 17.12.2025 р.

3. Вихідні дані проекту: Перспективи застосування АСЕ в сучасних реаліях, потужності енергогенераційних приладів, значення ємностей акумуляторних систем, математичні методики оптимізації

4. Зміст пояснювальної записки:

а) загальна частина – відомості про застосування та конструкцію АСЕ

б) аналітична частина – опис технічних характеристик елементів АСЕ та математичні методи оптимізації

в) електрична частина – виведення техніко-математичних параметрів обладнання АСЕ

5. Перелік графічного (ілюстративного) матеріалу:

1) Ілюстрації технічного обладнання електрогенеруючих систем

2) Графіки значень та відношень електрогенеруючого обладнання, графіки потужностей, графіки навантаження споживачів

3) Принципова схематика автономної електроустановки

6. Консультанти розділів проекту

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
1. Автономні системи енергопостачання на основі відновлювальних джерел енергії. Загальні положення	Башлій С.В., к.т.н., доцент кафедри ЕІКФС		
2. Методологія побудови автономних енергетичних систем	Башлій С.В., к.т.н., доцент кафедри ЕІКФС		
3. Аналіз енергоефективності АСЕ математичними методами	Башлій С.В., к.т.н., доцент кафедри ЕІКФС		
4. Техніко-економічне обгрунтування ефективності використання АСЕ	Башлій С.В., к.т.н., доцент кафедри ЕІКФС		

7. Дата видачі завдання: 27 лютого 2025 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів виконання дипломної роботи	Термін виконання етапів дипломної роботи	Примітка
1	Аналіз сучасного стану задіяння автономних систем енергопостачання	10.09.2025	
2	Основні елементи та структурна схема автономних систем енергопостачання	12.09.2025	
3	Визначення та написання теоретичної бази	15.09.2025	
4	Дослідження математичних методів підвищення енергоефективності	15.10.2025	
5	Оформлення роботи та презентації, підготовка до захисту	01.11.2025	

Студент:

Науковий керівник роботи: Рибак О.В.

Нормконтролер: Башлій С.В

Башлій С.В

РЕФЕРАТ

Рибак О.В., кваліфікаційна робота «Дослідження ефективності роботи автономних систем енергопостачання в різних умовах» здобувача вищої освіти рівня магістр 8.1414 спеціальності «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка», науковий керівник Башлій С.В., Запорізький національний університет, Навчально-науковий інститут ім. Ю.М. Потебні, Кафедра електричної інженерії та кіберфізичних систем, група 8.1414. ЗНУ. Запоріжжя. 2025.

Об'єкт дослідження: Моделі та концепції автономних систем енергопостачання, а також варіативні математичні методики, що пов'язані з контролем та розподілом електричної енергії.

Предмет дослідження: Системи контрою та акумулювання енергії, що знаходяться всередині автономних енергоустановок, сучасні дослідження про методи оптимізації автономних систем енергопостачання.

Мета роботи: Дослідити можливості з підвищення ефективності автономних систем енергопостачання на основі відновлювальних джерел енергії. Для досягнення мети використано розрахункові та аналітичні методи, кліматична характеристика регіонів України.

Методи дослідження: Під час дослідження використовувалися методи аналізу та узагальнення даних, методи математичної оптимізації для завдань з обмеженнями, методи математичного моделювання. Дослідження виконували з використанням імітаційного моделювання у середовищах Scilab X-Cos та Simulink, програмних комплексів MATLAB та GNU OCTAVE, а також MS Word, MS Excel.

Розвиток автономних енергосистем в останні десятиліття став одним з ключових напрямків в енергетиці, обумовленим як технологічним прогресом, так і зміною економічних і соціальних умов. Зростання енергоємності побутового та промислового споживання, збільшення кількості віддалених об'єктів, а також зростаюча вразливість централізованих мереж вимагають підвищення стійкості та диверсифікації джерел електричної енергії. У цих

умовах автономні енергосистеми виступають ефективним інструментом забезпечення надійного і безперебійного енергопостачання в районах з обмеженою або нестабільною мережевою інфраструктурою. Поєднання відновлюваних джерел енергії з сучасними системами накопичення та інтелектуальними алгоритмами управління відкриває нові можливості для оптимізації енергетичних потоків, зниження експлуатаційних витрат і зменшення екологічного впливу. Ці фактори визначають необхідність комплексного дослідження автономних енергосистем як перспективного компонента майбутньої енергетичної архітектури.

АВТОНОМНІ СИСТЕМИ ЕНЕРГОПОСТАЧАННЯ, АВТОНОМНА ЕЛЕКТРОУСТАНОВКА, ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ, ВІДНОВЛЮВАЛЬНІ ДЖЕРЕЛА ЕНЕРГІЇ, ВІТРОВІ ГЕНЕРАТОРИ, СОНЯЧНА ЕЛЕКТРОСТАНЦІЯ, СОНЯЧНА РАДІАЦІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ

ABSTRACT

Connection with scientific programmes, plans, topics: ‘Research on the efficiency of autonomous power supply systems in different conditions.’ Zaporizhzhia National University, Y.M. Potebnya Educational and Scientific Institute. Department of Electrical Engineering and Cyber-Physical Systems, group 8.1414. ZNU. INNI. 2025.

Purpose of the work: To explore opportunities for improving the efficiency of autonomous power supply systems based on renewable energy sources. To achieve the goal, computational and analytical methods and climatic characteristics of Ukrainian regions were used.

Research object: Models and concepts of autonomous power supply systems, as well as variable mathematical methods related to the control and distribution of electrical energy.

Subject of research: Energy control and storage systems located inside autonomous power plants.

Research methods: The research used methods of data analysis and generalisation, mathematical optimisation methods for constrained problems, and mathematical modelling methods. The research was carried out using simulation modelling in Scilab X-Cos and Simulink environments, MATLAB and GNU OCTAVE software packages, as well as MS Word and MS Excel.

Scientific novelty of the results: The possibility of implementing improvements and state-of-the-art optimisation methods in the field of autonomous power supply systems.

Practical significance of the work: The results obtained can be used:

- to improve existing energy storage systems in order to optimise their operation;
- in the implementation and design of new autonomous energy supply systems based on renewable sources;
- in the study of load schedules for different time intervals, electricity distribution, etc.

Publications:

1) Abstract of the report ‘The potential of autonomous energy installations based on renewable energy sources’ in the collection of scientific papers of the All-Ukrainian scientific and practical conference with the participation of young scientists and higher education students "Topical issues of society in the fields of environmental and civil security, energy conservation, management and economics," Rybak O.V., Erofeeva A.A.;

2) Abstract of the report ‘Analysis of the mathematical description of energy processes in AEU generation systems’ in the collection of scientific papers ‘Topical issues of society in the fields of environmental and civil security, energy conservation, management and economics’, Rybak O.V., Barishenko O.M.;

3) Abstract of the report ‘The spread of autonomous electrical systems based on renewable energy sources’ in the collection of scientific works of the All-Ukrainian scientific and practical conference with the participation of young scientists and higher education seekers ‘Topical issues of society in the fields of environmental and civil security, energy conservation, management and economics’, Rybak O.V., Bashliy S.V.

AUTONOMOUS POWER SUPPLY SYSTEMS, AUTONOMOUS ELECTRICAL INSTALLATION, POWER SUPPLY, RENEWABLE ENERGY SOURCES, WIND GENERATORS, SOLAR POWER PLANT, SOLAR RADIATION, ENERGY EFFICIENCY RESEARCH

ЗМІСТ

СКОРОЧЕННЯ ТА УМОВНІ ПОЗНАЧЕННЯ 11

ВСТУП 12

1. АВТОНОМНІ СИСТЕМИ ЕНЕРГОПОСТАЧАННЯ НА ОСНОВІ ВІДНОВЛЮВАЛЬНИХ ДЖЕРЕЛ ЕНЕРГІЇ. ЗАГАЛЬНІ ПОЛОЖЕННЯ 15

1.1 Поняття автономних систем енергопостачання 15

1.2. Потенціал відновлювальних джерел енергії в Україні та світі 17

1.3 Системи «Microgrid» для енергетики України 21

1.4 Механізми Net metering та Net billing для енергетики України 21

Висновки до розділу 1 23

2. МЕТОДОЛОГІЯ ПОБУДОВИ АВТОНОМНИХ ЕНЕРГЕТИЧНИХ СИСТЕМ НА ОСНОВІ ВДЕ 24

2.1 Загальні підходи до побудови автономних систем енергопостачання 24

2.2 Програмно-математичні характеристики автономних систем енергопостачання для їх моделювання 25

2.2.1 Умови впливу на побудовану автономну систему енергоспоживання 26

2.2.1.а Зовнішні умови 27

2.2.1.б Внутрішні умови 27

2.2.2 Генераційні системи 28

2.2.2.а Фотовольтаїчні системи 28

2.2.2.б Вітрогенератор 41

2.2.2.в Резервний генератор на вуглецевому паливі 48

2.2.3 Акумуляторна система 51

2.2.4 Перетворення та керування отриманою електроенергією АСЕ 54

2.2.4.а Інвертор 55

2.2.4.б Контролер 58

2.2.6. Аналіз існуючих програмних рішень для симуляції та оптимізації комплексів АСЕ на основі ВДЕ 66

2.3 Висновки до розділу 2 72

3. АНАЛІЗ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ АВТОНОМНОЇ СИСТЕМИ ЕНЕРГОПОСТАЧАННЯ МАТЕМАТИЧНИМИ МЕТОДАМИ 73

3.1 Термін «енергоефективність» 73

3.2 Оптимізація методів і засобів резервування ВДЕ 75

3.3 Аналіз математичних методів оптимізації 77

3.3.1 Режимні перемикання навантажень систем подачі електроенергії .. 79

3.3.1.а Метод найменших квадратів з обмеженнями рівності ECLS 80

3.3.2.б Метод найменших квадратів з обмеженнями нерівності ICLS 85

3.3.2.в Змішане цілочисельне лінійне програмування MILP 86

3.3.2.г Гібридні методи на основі LSM 86

3.3.3 Застосування режимних перемикань навантажень 87

3.3.4 Методика розподілу генераційних систем та акумуляторів АРО на основі FO-PID 93

3.3.5 Впровадження методу АРО на основі FO-PID 96

3.3.6 Інтегральні зміни піків навантаження 99

3.3.7 Впровадження методу інтегральних показників 101

3.4 Висновки до розділу 3 103

4. ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ВИКОРИСТАННЯ АВТОНОМНИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ СИСТЕМ НА ОСНОВІ ВДЕ 105

4.1 Технічні альтернативи 105

4.2 Обґрунтування економічної ефективності використання АСЕ 107

4.3 Розрахунок економічної вигоди АСЕ між АСЕ-ВДЕ та АСЕ на вуглецевому паливі 107

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ 110

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ 114

СКОРОЧЕННЯ ТА УМОВНІ ПОЗНАЧЕННЯ

АСЕ – автоматизовані системи енергопостачання;

ВГ – вітрогенератор;

ВДЕ – відновлювальні джерела енергії;

ВТ – вітротурбіна;

ДСТУ – державний стандарт України;

ККД – коефіцієнт корисної дії;

РГ – резервний генератор;

APO – Artificial Protozoa Optimizer, оптимізатор штучних найпростіших;

BESS – акумуляторні системи;

DSM – Demand-Side Management, керування через попит енергії;

FO-PID – Fractional-Order PID, розширений PID-контролер;

LPSP – Loss of Power Supply Probability,

NPC – Net Present Cost,

PV – фотовольтаїчні системи;

ECLS – Equality-Constrained Least Squares, метод найменших квадратів з обмеженнями рівності;

EMC – Energy Management System, метаматичні описи стратегій;

NOCT – номінальна робоча температура елемента;

MPPT – точка максимальної потужності;

PCS – Power Control System, стратегії енергетичного контролю;

SEF – Solar Energy Fraction, доля сонячної енергії в системі;

STC – Standard Test Conditions, стандартні умови випробувань.

ВСТУП

Актуальність теми: Розвиток автономних енергосистем в останні десятиліття став одним з ключових напрямків в енергетиці, обумовленим як технологічним прогресом, так і зміною економічних і соціальних умов. Зростання енергоємності побутового та промислового споживання, збільшення кількості віддалених об’єктів, а також зростаюча вразливість централізованих мереж вимагають підвищення стійкості та диверсифікації джерел електричної енергії. У цих умовах автономні енергосистеми виступають ефективним інструментом забезпечення надійного і безперебійного енергопостачання в районах з обмеженою або нестабільною мережевою інфраструктурою. Поєднання відновлюваних джерел енергії з сучасними системами накопичення та інтелектуальними алгоритмами управління відкриває нові можливості для оптимізації енергетичних потоків, зниження експлуатаційних витрат і зменшення екологічного впливу. Ці фактори визначають необхідність комплексного дослідження автономних енергосистем як перспективного компонента майбутньої енергетичної архітектури.

Мета і завдання дослідження: Метою є дослідження можливості з підвищення ефективності автономних систем енергопостачання на основі відновлювальних джерел енергії. Завданням є теоретичне описання сучасних методів моделювання та оптимізації автономних систем. Для досягнення мети використано розрахункові та аналітичні методи, кліматична характеристика в світі та регіонів України.

Об’єкт дослідження: Моделі та концепції автономних систем енергопостачання, а також варіативні математичні методики, що пов’язані з контролем та розподілом електричної енергії.

Предмет дослідження: Системи контрою та акумулювання енергії, що знаходяться всередині автономних енергоустановок, сучасні дослідження про методи оптимізації автономних систем енергопостачання.

Методи дослідження: Під час дослідження використовувалися методи аналізу та узагальнення даних, методи математичної оптимізації для завдань з обмеженнями, методи математичного моделювання. Дослідження виконували з використанням імітаційного моделювання у середовищах Scilab X-Cos та Simulink, програмних комплексів MATLAB та GNU OCTAVE, а також MS Word, MS Excel.

Наукова новизна одержаних результатів: Можливість впровадження удосконалень та найсучасніших методів оптимізації в сфері автономних систем енергопостачання.

Теоретичне та практичне значення дослідження: Отримані результати можуть використовуватися:

- для удосконалення існуючих або майбутніх систем накопичувачів енергії, розподілу енергії, а також для оптимізації їх роботи;
- при запровадженні та проектуванні нових автономних систем енергопостачання на основі відновлювальних джерел;
- при дослідженні графіків навантажень різних часових інтервалів, розподілу електроенергії, тощо;
- при формулюванні науково-технічних інструкцій щодо моделювання сучасних систем в програмному та фіічному просторах, інше.

Публікації:

1) Тези доповіді «Потенціал автономних енергетичних установок на основі ВДЕ» в збірнику наукових праць Всеукраїнської науково-практичної конференції за участю молодих учених та здобувачів вищої освіти «Актуальні питання суспільства у сферах екологічної та цивільної безпеки, енергозбереження, менеджменту та економіки», Рибак О.В., Єрофєєва А.А.;

2) Тези доповіді «Аналіз математичного опису енергетичних процесів в генераційних системах АЕУ» в збірнику наукових праць «Актуальні питання суспільства у сферах екологічної та цивільної безпеки, енергозбереження, менеджменту та економіки», Рибак О.В., Барішенко О.М.;

3) Тези доповіді «Поширення автономних електричних систем на основі відновлювальних джерел енергії» в збірнику наукових праць Всеукраїнської науково-практичної конференції за участю молодих учених та здобувачів вищої освіти «Актуальні питання суспільства у сферах екологічної та цивільної безпеки, енергозбереження, менеджменту та економіки», Рибак О.В., Башлій С.В.

Структура та обсяг: Сторінок – 114, розділів – 4, таблиць – 7, рисунків – 31, формул – 55.

1. АВТОНОМНІ СИСТЕМИ ЕНЕРГОПОСТАЧАННЯ НА ОСНОВІ ВІДНОВЛЮВАЛЬНИХ ДЖЕРЕЛ ЕНЕРГІЇ. ЗАГАЛЬНІ ПОЛОЖЕННЯ

1.1 Поняття автономних систем енергопостачання

Автономна електрична система – це система, призначена для виробництва, зберігання та споживання електроенергії без необхідності підключення до централізованих електричних мереж. Такі системи здатні працювати незалежно, забезпечуючи енергію для різних потреб. Вони відіграють важливу роль у сучасній енергетиці, забезпечуючи незалежне енергопостачання в умовах відсутності доступу до централізованих електричних мереж або в разі необхідності підвищення надійності та стійкості електропостачання.

Використання електричної енергії в технологічних процесах залишається фундаментальним елементом людської діяльності, що неминуче впливає на фізичне оточення. Наслідки цього впливу можуть бути як сприятливими, так і несприятливими для людини та інфраструктури. Енергетичні системи, що забезпечують виробництво та розподіл електроенергії, не є винятком: їх впровадження та експлуатація часто супроводжуються значними технічними, економічними та екологічними викликами. Особливо гостро проблеми проявляються в ситуаціях, коли доступ до централізованого електропостачання ускладнений або повністю відсутній, наприклад, через географічну віддаленість, відсутність інфраструктури або її руйнування.

Одним з найбільш доступних способів компенсувати нестачу електроенергії у віддалених або важкодоступних районах є використання автономних енергосистем. В їх основі лежать установки, здатні виробляти електрику за рахунок природних енергетичних потоків – таких як кінетична енергія вітру (вітрогенератори) або сонячне випромінювання (фотовольтаїчні панелі, PV). За останні десятиліття розвиток і здешевлення технологій відновлюваної енергетики значно розширили можливості їх застосування,

зробивши автономні джерела живлення затребуваними в побутових, промислових і технологічних сферах.

Завдяки цьому приватні споживачі отримали можливість будувати власні малопотужні електростанції для забезпечення пристроїв, робота яких вимагає мережевої напруги побутового рівня. Такі системи можуть функціонувати як у змішаному режимі – доповнюючи централізовану мережу і знижуючи навантаження на неї, так і повністю автономно, забезпечуючи незалежність від зовнішніх постачальників енергії.

Причини будівництва автономних енергосистем надзвичайно різноманітні. Вони включають складність прокладання ліній електропередачі, відсутність технічної можливості встановлення розподільних пристроїв, географічну віддаленість споживача або екстремальні кліматичні умови. У ряді країн, включаючи Україну, додатковим фактором стає руйнування енергетичної інфраструктури, що робить стабільну передачу електроенергії неможливою. Навіть після проведення ремонтних робіт мережа залишається вразливою для повторних пошкоджень, що призводить до систематичних збоїв електропостачання.

В умовах, коли централізована енергосистема не справляється з навантаженням або піддається ризикам руйнування, впровадження автономних джерел живлення стає не просто альтернативою, а нагальною необхідністю – як для побутових споживачів, так і для підприємств, діяльність яких залежить від безперебійного енергопостачання.

Ключовими факторами, що визначають вибір і конфігурацію автономних енергосистем, є фізичні та фінансові обмеження. Вартість доставки, монтажу та обслуговування генераційного обладнання безпосередньо залежить від географічних і кліматичних умов, а подальша ефективність експлуатації визначається як фізичним розташуванням установки, так і характером і графіком енергоспоживання. Таким чином, проектування та оптимізація автономних енергосистем вимагають комплексного підходу, що враховує взаємозв’язок технічних, економічних та експлуатаційних параметрів.

1.2. Потенціал відновлювальних джерел енергії в Україні та світі

Насьогодні, в розвинених країнах ВДЕ остаточно перестали розглядатися як допоміжні технології і стали одним із структуроутворюючих елементів національних енергетичних систем розвинених держав. У 2025 році країни Європи та Північної Америки демонструють стійкий перехід до моделі низьковуглецевої генерації, в якій сонячна, вітрова та гідроенергетика займають домінуючі позиції за приростом потужностей і вносять ключовий внесок у досягнення кліматичних цілей. Цей процес супроводжується прискореним технологічним розвитком, інституційними реформами та структурними змінами енергоринків [1, 2]. Також з цим, країни ЄС прогнозували [3], та приділяли значну увагу [2] питанням гнучкості енергосистеми – від впровадження інтелектуальних мереж до розвитку акумуляторних систем, що забезпечують компенсацію сезонних і добових коливань видобутку енергії від ВДЕ.

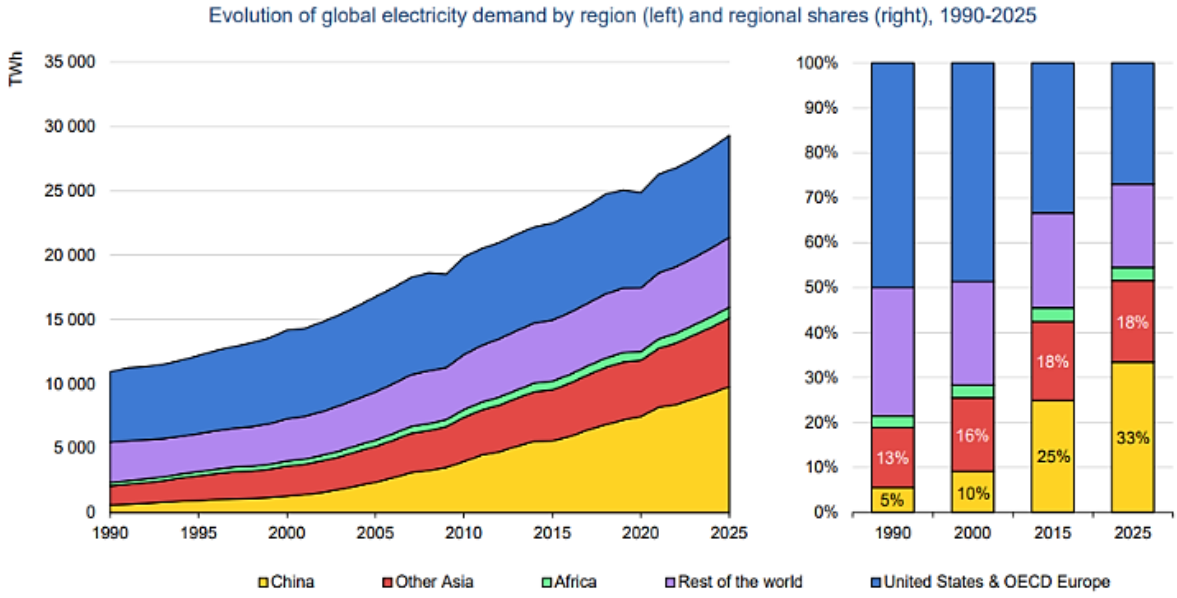


Рисунок 1.1 – Еволюція світового попиту на електроенергію за регіонами (ліворуч) та регіональні частки (праворуч), 1990-2025 рр. [3]

Північноамериканський регіон також демонструє стійке розширення «чистої» енергетики, хоча темпи зростання варіюють між країнами. У США

розвиток ВДЕ багато в чому визначається поєднанням ринкових механізмів і федеральних стимулів, включаючи податкові пільги, прямі субсидії та розширення програм підтримки розподілених енергетичних ресурсів. Сильним фактором є участь великих комерційних споживачів – промисловості, дата-центрів і великих компаній, які замовляють будівництво сонячних і вітрових парків через довгострокові енергетичні контракти [2]. У Канаді тенденції аналогічні, але істотний вплив має висока частка гідроенергетики, яка служить стабільною основою для інтеграції нових сонячних і вітрових станцій [1].

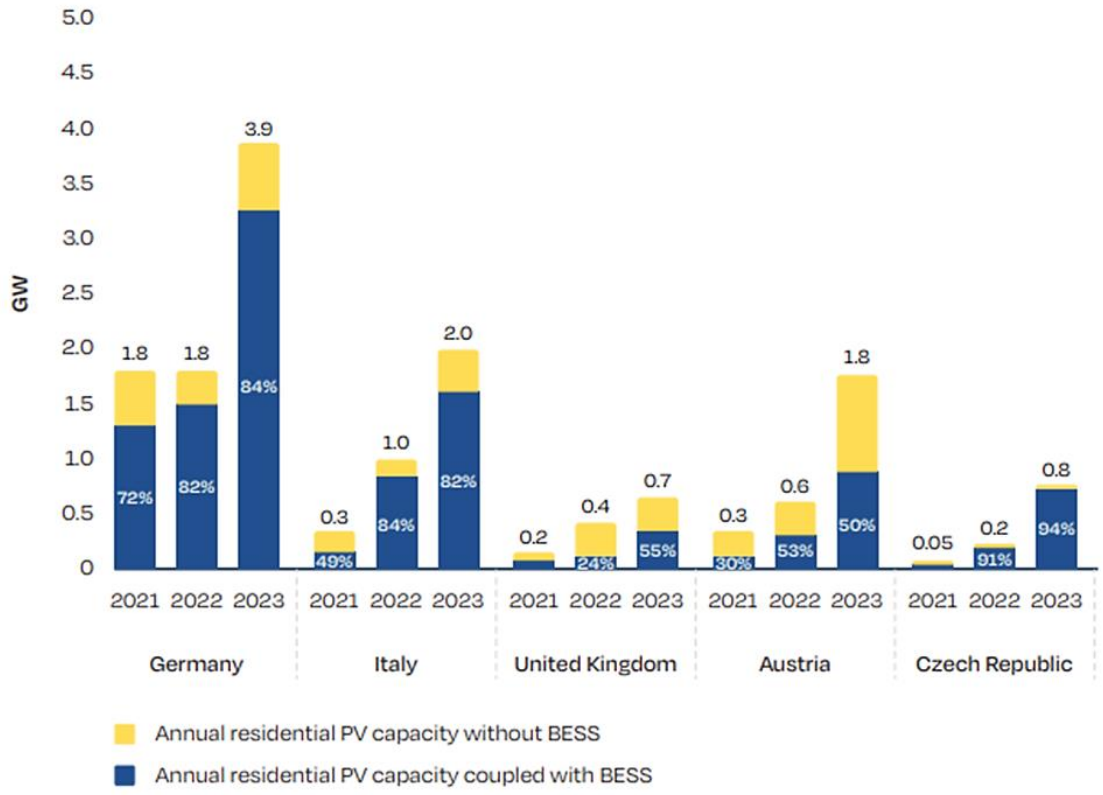


Рисунок 1.2 – Щорічні установки сонячних PV систем для житлових будинків, у тому числі поєднанні з акумуляторними батареями [3]

Ринок ЄС також відрізняється стрімким розширенням BESS-сегменту, який забезпечує стабільність і дозволяє збільшувати пропускну здатність електроенергетичної системи без масштабної реконструкції мереж. Північні та західноєвропейські країни, зокрема Німеччина, Данія та Нідерланди [1, 4, 6], зосереджуються на масштабному введенні вітрових потужностей, включаючи

офшорні установки. Південні держави – Іспанія, Італія, Португалія [1, 4] – розвивають переважно сонячну енергетику завдяки сприятливим кліматичним умовам і високій інсоляції.

Інституційна структура європейських ринків відрізняє їх від багатьох інших регіонів: присутній розвинений конкурентний ринок електроенергії, високий рівень прозорості, наявність загальних регуляторних стандартів ЄС і істотна частка приватних інвестицій в енергетичні проекти. На окрему увагу заслуговують механізми аукціонів на поставку «зеленої» енергії, які забезпечують цінову конкуренцію між проектами і сприяють зниженню вартості виробництва. При цьому стійкий попит на ВДЕ формується не тільки з боку держави та енергетичних компаній, але й з боку приватного сектора, який зацікавлений у зниженні вуглецевого сліду та хеджуванні ризиків, пов’язаних з цінами на викопне паливо [2].

Вплив ВДЕ на європейський ринок електроенергії проявляється у зростанні гнучкості та збільшенні сезонної волатильності цін. Розвиток накопичувачів енергії, інтелектуальних мереж і цифрових систем управління поступово знижує ці коливання, створюючи передумови для подальшого зростання частки змінної генерації.

Ринки США і Канади мають іншу структуру, ніж європейські, і значною мірою залежать від регіональних особливостей. У США відсутнє єдине централізоване регулювання енергетики, що призводить до значних відмінностей між штатами. Каліфорнія, Техас і середньоатлантичні штати демонструють найвищі темпи впровадження сонячних і вітрових систем завдяки поєднанню економічної привабливості та регулюючих стимулів. Водночас у ряді інших регіонів переважають традиційні джерела генерації, що відображає відмінності в енергетичному попиті та доступності інфраструктури [4]. США відрізняються високою часткою приватного капіталу і розвиненим ринком довгострокових контрактів, через які великі компанії замовляють будівництво об’єктів ВДЕ, фактично виступаючи драйверами розвитку галузі. Це створює стійкий попит на нові проекти навіть при коливаннях кредитних ставок і

політичній невизначеності. Крім того, саме в США активно розвивається виробництво обладнання для ВДЕ, включаючи сонячні панелі, акумуляторні системи та вітрогенератори, що зміцнює внутрішню промисловість і знижує залежність від імпорту [4].

Широкомасштабне впровадження ВДЕ в Україні є не тільки технологічною тенденцією, але й стратегічною необхідністю, зумовленою сукупністю економічних, інфраструктурних, енергетичних і геополітичних факторів. Перехід до стійких моделей генерації набуває особливого значення в умовах постійних ризиків для централізованої енергосистеми, що робить децентралізовані та автономні рішення одним із ключових напрямків підвищення національної енергетичної стійкості.

Руйнування енергетичної інфраструктури, що спостерігаються в останні роки, показали вразливість традиційної централізованої системи розподілу електроенергії. Пошкодження високовольтних ліній, трансформаторних підстанцій і генеруючих потужностей призводить до тривалого обмеження електропостачання цілих регіонів, а відновлення в ряді випадків ускладнене через повторювані атаки і обмежений доступ фахівців до аварійних зон. У таких умовах автономні енергосистеми – як індивідуального, так і комунального рівня – дозволяють забезпечувати базове електропостачання незалежно від стану магістральних мереж і суттєво скорочують соціально-економічні втрати.

Зростаюча частка розподіленої генерації, заснованої на сонячних, вітрових і гібридних установках, сприяє формуванню більш стійкої та адаптивної структури енергоспоживання. Завдяки своїй модульності та масштабованості автономні системи дозволяють швидко реагувати на зміни попиту, забезпечують гнучкість експлуатації та здатні функціонувати в умовах значних коливань навантаження. Це особливо важливо для віддалених населених пунктів, критично важливих об’єктів інфраструктури, а також для підприємств, діяльність яких залежить від безперебійного електропостачання.

Широке впровадження автономних і гібридних систем тісно пов’язане з економічною доцільністю. Зниження вартості фотоелектричних модулів, систем

накопичення енергії та електроніки управління за останні десять років, а також розвиток вітчизняного та європейського ринків обладнання роблять установку автономних систем все більш доступною як для домогосподарств, так і для малого та середнього бізнесу. Зменшення залежності від імпортованих енергоносіїв призводить до зниження валютних ризиків і сприяє зміцненню енергетичної незалежності країни.

Розвиток автономних систем ВДЕ відповідає екологічним і міжнародним зобов'язанням України щодо зниження викидів парникових газів. Підвищення частки безвуглецевої генерації є необхідною умовою інтеграції в європейський енергетичний простір, а також фактором довгострокової конкурентоспроможності національної економіки. Використання екологічно чистої енергії не тільки знижує екологічний слід, але й сприяє формуванню інноваційних галузей і зростанню нових технологічних ринків.

1.3 Системи «Microgrid» для енергетики України

Системи мікромереж (англ. Microgrid) є стратегічним рішенням для енергетичних безпеки та децентралізації України, особливо актуальним через військові ризики, оскільки забезпечують надійне живлення критичної інфраструктури під час відключень основної мережі, знижують втрати, інтегрують «зелену» електроенергію і дозволяють економити кошти, переходячи в автономний режим за потреби. Вони стають невід'ємною частиною енергосистеми для громад та бізнесу, підвищуючи стійкість завдяки локальному управлінню та можливості роботи з відновлюваними джерелами енергії, що допомагає досягти енергетичної незалежності та зменшити вплив на довкілля [5].

1.4 Механізми Net metering та Net billing для енергетики України

Натепер в Україні «зелений тариф» замінюється механізмами Net Metering та Net Billing, які стимулюють розвиток ВДЕ для активних споживачів. дозволяє

накопичувати надлишки в одиницях кВт*год, забираючи їх пізніше (в межах року). Net Billing нараховує кошти за надлишок за ринковою ціною на особовий рахунок, що використовується для оплати спожитої енергії, пропонуючи гнучкіший фінансовий розрахунок і є заміною «зеленому» тарифу, регулюється Постановою НКРЕКП №2651 [6, 7].

Висновки до розділу 1

Технології ВДЕ не зменшують темпи зростання в розвинених країнах світу, такі як США, Канада, Німеччина, Італія, тощо, що тільки зміцнює позиції на енергетичному ринку нових технічних продуктів і їх реалізацію продажів. Рекордні частки у виробництві електроенергії, масове впровадження сонячних і вітрових потужностей, зниження вартості технологій, розвиток «розумних» систем зберігання та управління.

Подальший успіх залежить від здатності держав і компаній подолати технологічні, інфраструктурні та економічні бар’єри. Масштабне розгортання інфраструктури, модернізація мереж, гнучкі тарифи, стимулювання інновацій – ключові фактори для забезпечення простору ВДЕ подальшого впровадження у світі.

Ідеї про розвиток ринку відновлюваних джерел в Україні є цілком обґрунтованими і навіть готовими до виконання, що спричинить розвиток автономного або гібридного електропостачання для споживачів побутового та комерційного рівнів.

2. МЕТОДОЛОГІЯ ПОБУДОВИ АВТОНОМНИХ ЕНЕРГЕТИЧНИХ СИСТЕМ НА ОСНОВІ ВДЕ

2.1 Загальні підходи до побудови автономних систем енергопостачання

Принцип дії АСЕ полягає в наступному:

1) Електрична енергія, що вироблена джерелом, надходить на контролер заряду. Це прилад, який запобігає перезарядженню системи, блокує процес при досягненні граничних показників. Він компенсує втрати і знижує навантаження на акумуляторну систему.

2) З контролера струм розподіляється на інвертор і акумуляторну батарею. Інвертуючий елемент перетворює постійну природу струму в змінну. Акумулююча ємність служить для усунення перебоїв електроенергії, що подається від поновлюваного джерела (наприклад, при слабкому вітряному потоці або похмурій погоді).

3) З інвертора або акумуляторної батареї струм надходить безпосередньо до споживача для живлення побутових приладів та освітлення.

На надійність автономної системи впливають кабелі, вимикачі, запобіжники, автомати та інші електромеханічні пристосування. Вони повинні бути надійними і якісними, щоб не вивести з ладу енергопостачання.

Приклад автономної системи, що поєднує сонячну та вітрову енергію: Протягом дня, коли світить сонце, сонячні панелі виробляють електроенергію, яка зберігається в системі акумулювання, для подальшого використання. Вночі, коли генерація фотопанелей відсутня, вітрогенератори використовують рух повітря для отримання додаткової електроенергії та зарядки акумуляторів. Ще один приклад гібридної системи, що поєднує сонячну та гідроенергію. Резервний генератор може використовуватись як підтримка струмом в піки навантаження, при необхідних для системи параметрах, що зберігає її надійність, тощо.

Природа струму у фотопанелей та вітрогенераторів відрізняється (постійний та змінний), тому в автономних системах змінного струму, для

живлення навантажень постійного струму, використовується перетворювач змінного струму в постійний. Інші ВДЕ також можуть бути включені через відповідний інтерфейс перетворювачів енергії. Кожне джерело живлення підключається до шини змінного струму через окремий перетворювач живлення, що дозволяє їм продовжувати діяти у схемі, навіть якщо одне з них відключено, однак синхронізація є основною перешкодою в цій конфігурації.

2.2 Програмно-математичні характеристики автономних систем енергопостачання для їх моделювання

Для дослідження фізичних процесів, використовують програмно-математичні моделі, в яких використовують математично еквіваленті системи, що модулюють явища у програмному просторі. Такий спосіб дослідження дозволяє отримувати математичні дані з моделей, що математично подібні з фізичними моделями, або з реальними автономними електроустановками.

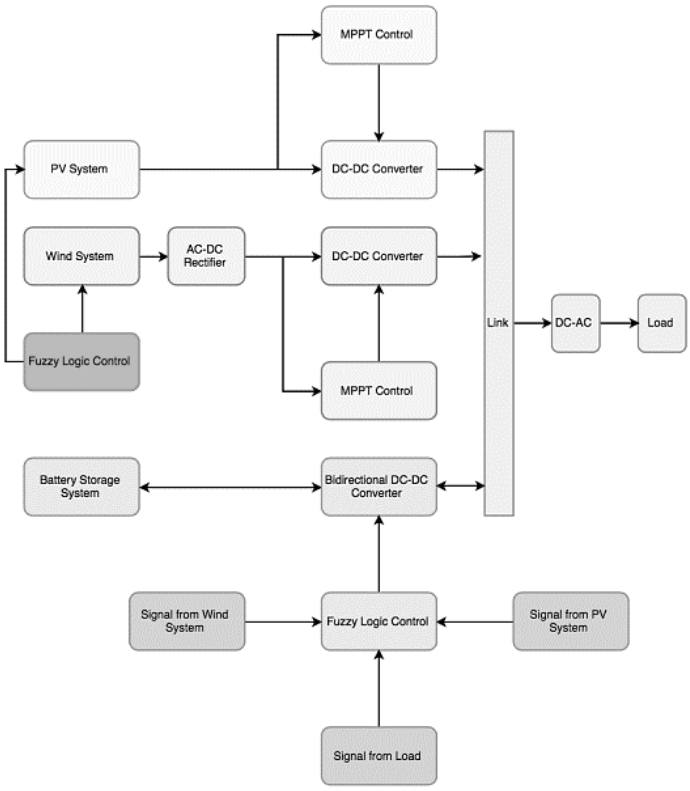


Рисунок 2.1 – Блок-схема контролю комбінованої АСЕ

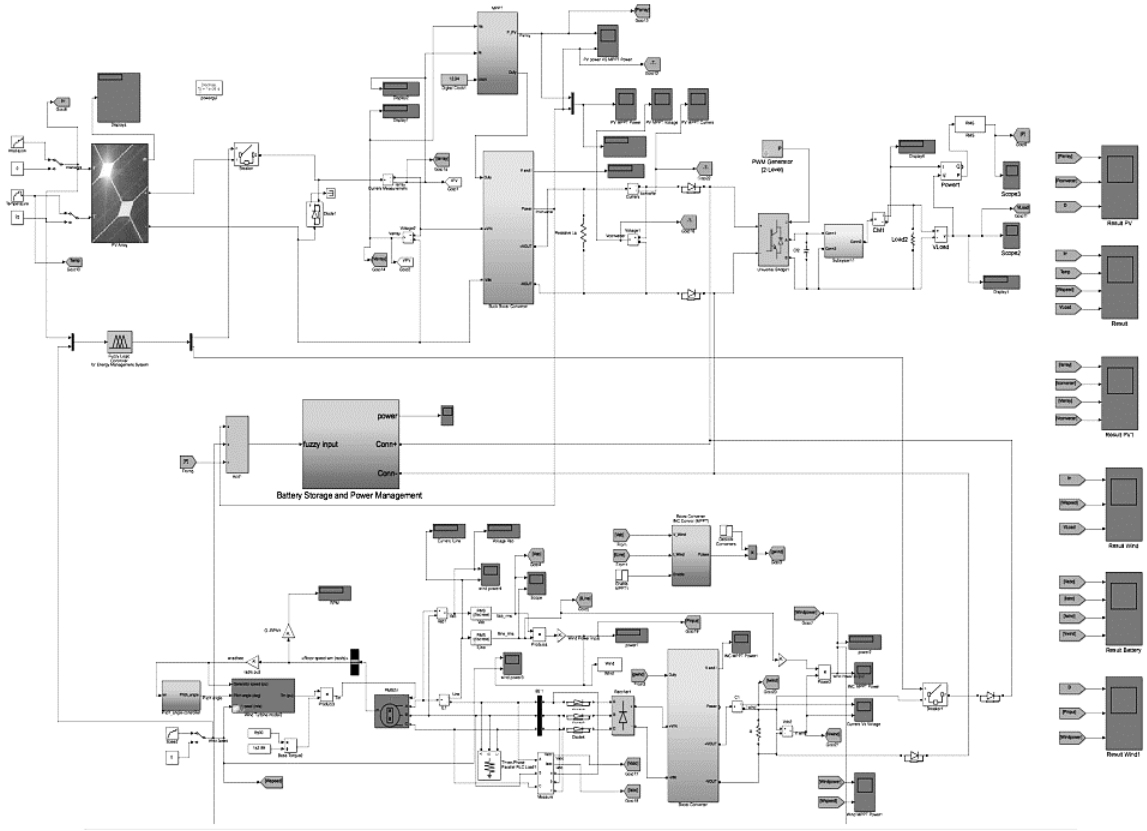


Рисунок 2.2 – Приклад дослідницької схематичної моделі автономної системи енергопостачання в програмному просторі Simulink

2.2.1 Умови впливу на побудовану автономну систему енергоспоживання

Такі умови можна поділити на дві категорії: на ті, що діють ззовні системи (зовнішні), і такі, що є безпосередньо частиною самої системи (внутрішні).

Зовнішні умови представляють собою подовженні за часом дії або сили, що враховуються схемою контролю. До них входять й початкові умови, що надають енергію в системі для подальшої її передачі.

Внутрішні умови використовують або змінюють стан елементів у схемі, враховуються контролером або центром керування як короткі за часом, але їм притаманні постійні змінні (впливи) на систему.

2.2.1.а Зовнішні умови

Кліматичні та стохастичні параметри ВДЕ: Моделі повинні враховувати варіації сонячної радіації, швидкості вітру, температури, хмарності, які описуються часовими рядами або імовірнісними процесами. Ці параметри визначають генерацію PV і вітрогенераторів [8, 9].

Навантажувальні профілі споживача: Зовнішні умови включають добову, тижневу і сезонну структуру навантаження, випадкові пікові значення, стохастичні і детерміновані компоненти споживання (Fourier-аналіз, кластеризація часових рядів, імовірнісні розподіли навантажень).

Інфраструктурні та територіальні значення: Зовнішні умови включають доступність палива для дизель-генератора, умови транспортування обладнання, рівень автономності, нормативні обмеження, а також географічні параметри (широта, кліматична зона), що впливають на продуктивність ВДЕ.

2.2.1.б Внутрішні умови

Електричні параметри елементів системи: Моделі повинні враховувати динаміку напруги, струму, частоти і фазових співвідношень між підсистемами: фотоелектричними модулями, вітрогенераторами, інверторами, накопичувачами енергії і резервним генератором. Ці параметри описуються рівняннями Кірхгофа, моделями кіл змінного струму, еквівалентними схемами PV-модулів і синхронних/асинхронних машин.

Енергетичні баланси та внутрішні обмеження: Функціонування АСЕ визначається балансом, динамікою заряду акумуляторних систем, а також обмеженнями потужності інверторів, швидкостей заряд/розряд батарей і мінімально допустимих режимів резервного генератора (мінімальне навантаження, обмеження частих запусків, тощо).

Алгоритми управління: до впливу на внутрішні умови включають математичні описи стратегій EMC, або стратегії енергетичного контролю PCS: методи оптимізації (лінійне/нелінійне програмування, стохастична оптимізація, схематика), управління за пріоритетами джерел, підтримка частоти і напруги (V/f-контроль, droop-контроль та інші).

2.2.2 Генераційні системи

Будь-який прилад, що утворює та передає електроенергію, будучи під'єднаним до схеми ACE, стає генератором електроенергії. Це перші та найсуттєвіші до зовнішніх умов елементи системи, оскільки вони напряму отримують фізичну енергію, що потім буде перетворена. Комплексне використання генераторів утворюють генераційну систему. Для ACE, що може бути встановлена на відкритій площині, буде, як правило, три варіанти, що далі перечисленні.

2.2.2.a Фотовольтаїчні системи

Фотовольтаїчний прилад (сонячна панель) отримує енергію від світлового випромінювання та перетворює його шляхом внутрішніх фізичних процесів (P-N переходу) всередині фотоелектричної комірки, після чого енергія стає електричною, і у вигляді струму передається далі в ACE. Фотоелектричний ефект відіграє значну роль у роботі фотоелектричної комірки.

Цю енергетичну трансформацію можна описати наступним чином: коли фотон, що надходить від сонячного випромінювання, потрапляє на фотоелектричну комірку, електрони в напівпровіднику збуджуються і переходять з валентної зони, яка є зоною з найвищою (найвигіднішою) енергією, до зони провідності і стають вільними для руху. Ці електрони рухаються по певній траєкторії під дією електричного поля. Рух електронів створює позитивні

та негативні клеми і напругу між ними, завдяки чому постійний струм починає текти по колу ACE, коли між цими клемами підключається зовнішнє коло.

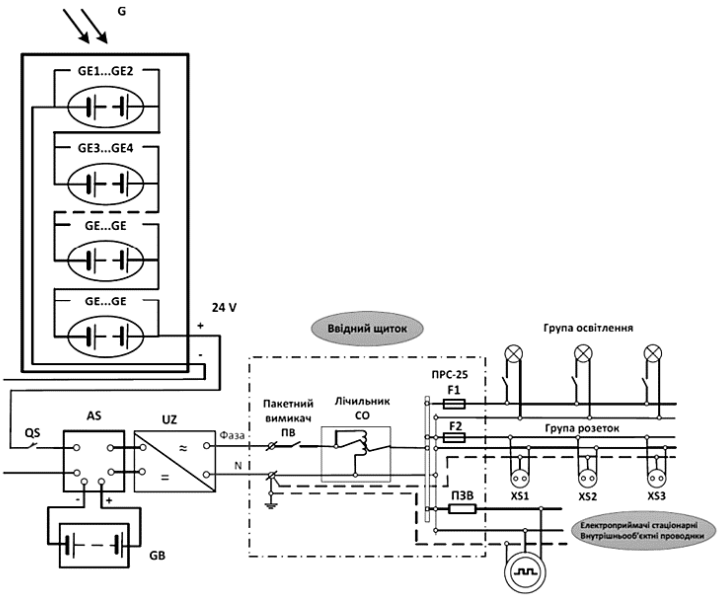


Рисунок 2.3 – Схема електропостачання встановленої фотовольтаїчної системи, де G – сонячна батарея; GE – фотоелектричний модуль; GB – акумуляторна батарея; QS – вимикач; AS – зарядний пристрій; UZ – інвертор [8]

Фотоелектрична комірка вважається основним елементом сонячної фотоелектричної системи. Зазвичай кількість енергії, що генерується фотоелектричною коміркою, обмежена декількома ватами через обмеження площі поверхні. Тому фотоелектричні комірки поєднуються послідовно або паралельно для створення фотоелектричного модуля. Крім того, фотоелектричні модулі можна поєднувати послідовно, паралельно або і так, і так; щоб створити фотоелектричну батарею для генерації необхідного струму та напруги [11, 12].

Фотоелектричний модуль, відомий як панель, являє собою групу комірок, з'єднаних паралельно або послідовно (зазвичай 36 або 72), для отримання більшої (цілісної) потужності та напруги. При послідовному з'єднанні напруга фотоелектричного модуля дорівнює сумі окремих напружень у кожної фотоелектричної комірки, і всі фотоелектричні комірки мають однаковий струм. Але при паралельному з'єднанні вихідна напруга фотоелектричного модуля буде

схожою на напругу однієї фотоелектричної комірки, а струм буде дорівнювати сумі струмів кожної окремої фотоелектричної комірки [9, 12, 13].

Фотоелектрична система, як правило, містить фотоелектричну батарею, яка перетворює сонячне випромінювання в електричну енергію, перетворювач постійного струму в постійний струм з понижувальним і підвищувальним перетворювачем, а також систему управління відстеженням точки максимальної потужності для отримання точки максимальної потужності. Блок-схема контрольних елементів запропонованої фотоелектричної системи показана на рис. 2.4.

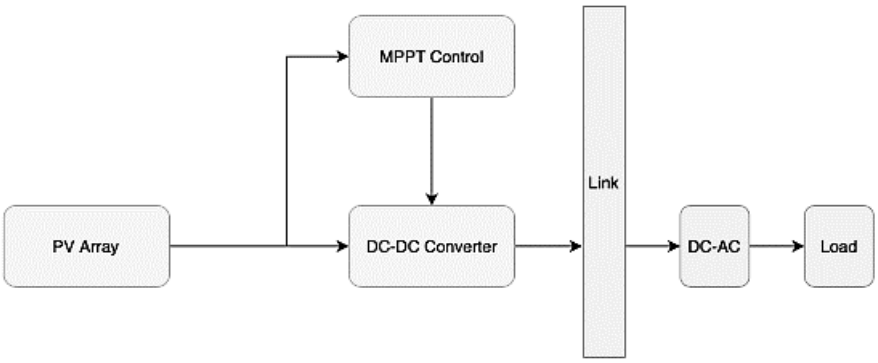


Рисунок 2.4 – Блок-схема елементів контролю для фотоелектричної системи

Стандартні умови випробувань STC – це промисловий стандарт, який використовується більшістю виробників для вимірювання продуктивності різних фотоелектричних елементів. Параметри та результати, отримані в результаті вимірювань, зазвичай вказуються у технічних характеристиках виробника. Вимірювання проводяться за спеціальними вимогами до випробувань, а саме інтенсивність сонячного випромінювання 1000 $\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}$, стандартний спектр AM1.5 та температура фотоелектричного елемента або модуля 25 °C з погрішністю ± 2 °C [9]. Однак у польових умовах фотоелектричні пристрої зазвичай працюють при вищих і дещо нижчих температурах, тому виробники подають дані про продуктивність відповідно до номінальної робочої

температури елемента NOCT, що має на меті більш точно імітувати реальні умови [10].

Вихідна електрична потужність фотоелектричної панелі може бути виражена таким чином [9, 10, 11, 12]:

$$P_{pv} = G_{pv} \cdot f_{pv} \cdot \left(\frac{N_T}{N_{T,S}}\right) \cdot [1 + \alpha_p(T_c - T_{C,S})]$$

де N_T та $N_{T,S}$ – рівень сонячної інсоляції, кВт/м^2;

G_{pv} – номінальна потужність фотомодуля;

T_c – температура фотовольтаїчної комірки при 25 °C;

$T_{C,S}$ – температура фольтовольтаїчної комірки при дослідницьких умовах;

f_{pv} – коефіцієнт зменшення фотоелектричної системи;\

α_p – температурний коефіцієнт потужності;

Для розрахунку повного впливу кута нахилу на потужність, яка вироблена фотоелектричною станцією необхідно ввести ще декілька змінних, що відповідають за геометричне розташування об’єкту генерації енергії фотонів в електричну, які показані на рисунку 2.5.

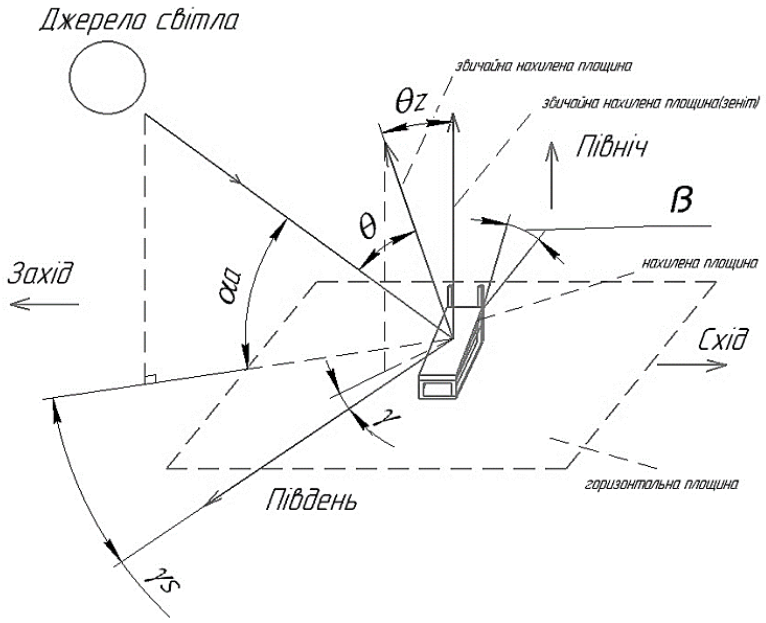


Рисунок 2.5 – Геометричний вигляд розташування сонячних панелей у тривимірному просторі

Можливо вивести залежність значення рівня сонячної інсоляції від кута нахилу протягом року. Даний вираз можливо записати наступним чином [13]:

$$\delta = 23{,}45 \cdot \sin\left(360\frac{284 \cdot n}{365}\right) \quad (2.1)$$

де n – порядковий номер дня в році, відрахований від 1-го січня.

Звідси:

$$N_0 = S_c(1 + 0{,}034\cos\frac{2\pi n}{365}) \quad (2.2)$$

де S_c – сонячна постійна, оцінка середньорічного позаземного випромінювання: 1377, Вт/м^2.

Електрична схема ідеальної фотоелектричної комірки представлена на для пояснення аналізу ідеальних фотоелектричних комірок в еквівалентних електричних схемах з внутрішніми та зовнішніми умовами. Ця схема може бути змодельована джерелом струму, що залежить від випромінювання і температури, паралельно з інвертованим ідеальним діодом.

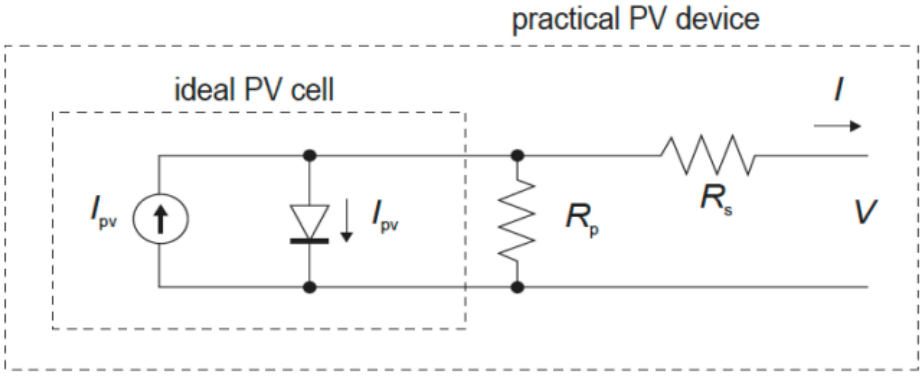


Рисунок 2.4 – Електрична схема ідеальної однодіодної фотоелектричної комірки

Наступне рівняння може математично описати ідеальну фотоелектричну комірку [14]:

$$I = I_{pv} - I_0[e\left(\frac{q \cdot V}{\alpha \cdot k \cdot T}\right) - 1] \quad (2.3)$$

де I_{pv} – струм, що утворюється під дією сонячного випромінювання, А;

I_0 – струм витоку, А;

V – напруга комірки, В;

q – заряд електрона, 1,602×10-19 Кл;

α – коефіцієнт ідеальності діоду;

T – температура оточуючого середовища, К;

k – постійна Боцмана, 1,3807×10-23 Дж/К.

Рівняння струму діода Шоклі дорівнює другій частині рівняння, коли *I-V* характеристична крива має зворотньо-експанетне відношення від струму I [$V = variable,\ I_{pv} = const,\ I_{pv} - I_d = I$], фотоелектричної комірки описує це рівняння:

$$I_D = I_0[e\left(\frac{q \cdot V}{\alpha \cdot k \cdot T}\right) - 1] \qquad (2.4)$$

Фотоелектрична комірка або модуль зазвичай описуються за допомогою моделі з одним діодом, або моделі з подвійною експонентою. Модель з подвійною експонентою має ще один діод, що підключений паралельно. Ця модель є більш доречною, ніж модель з одним діодом, але потребує більше розрахункових операцій, тому модель з одним діодом використовується значно частіше.

Ідеальну модель фотоелектричної комірки можна теоретично виразити за допомогою джерела струму з інвертованим діодом, однак, на практиці, до схеми додаються паралельні та послідовні резистори.

Послідовний опір розміщується через металеві контакти та перешкоди на шляху потоку електронів від P-N переходу. Послідовний резистор є важливим параметром, оскільки він зменшує максимальну вихідну потужність і струм короткого замикання фотоелектричної комірки. Паралельний резистор або шунтовий резистор представляє втрати через поверхневий струм витоку або через виробничі дефекти. Тому струм представлений на основі напруги та інших додаткових параметрів, як показано в наступному рівнянні:

$$I = I_{pv} - I_0 \left[e \left(\frac{V+IR_s}{\alpha \cdot V_T} \right) - 1 \right] - \left[\frac{V+IR_s}{R_p} \right] \quad (2.5)$$

де, I_{pv} – струм від енергетичних комірок, А;

I_0 – зворотній струм насичення, А;

V – напруга в діоді, В;

α – коефіцієнт ідеальності діоду;

V_T – термонапруга, В;

R_s – еквівалентний послідовний опір, Ом;

R_p – еквівалентний паралельний опір, Ом.

Наступне рівняння описує умови, що впливають на фотострум фотоелектричного елемента [14]:

$$I_{pv} = (I_{\frac{pv}{STC}} + K_1 \Delta T)(\frac{G}{G_{STC}}) \quad (2.6)$$

де $I_{\frac{pv}{STC}}$ – струм, що генерується в умовах STC, А;

K_1 – температурний коефіцієнт струму короткого замикання;

G – сонячна радіація, $\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}$;

G_{STC} – сонячна радіація в умовах STC, $\frac{\text{кВт}}{\text{м}^2}$.

Від цього, наступне рівняння відображає вплив температури на зворотний струм насичення [14]:

$$I_0 = I_{\frac{0}{STC}} \left(\frac{T_{STC}}{T} \right)^3 e[(\frac{q \cdot E_g}{\alpha K})(T_{STC}^{-1} - T^{-1})] \quad (2.7)$$

де $I_{\frac{0}{STC}}$ – номінальний струм насичення при STC;

T_{STC} – температура при STC;

E_g – енергія забороненої зони напівпровідника.

Крім того, поєднав наведені вище рівняння, зворотний струм насичення буде таким [14]:

$$I_0 = \frac{I_{\frac{SC}{STC}} + K_1 \Delta T}{e\left[\frac{V_{\frac{OC}{STC}} + K_v \Delta T}{\alpha V_T}\right] - 1} \tag{2.8}$$

де $I_{\frac{SC}{STC}}$ – струм короткого замикання при STC;

$V_{\frac{OC}{STC}}$ – напруга в розімкнутому колі при STC;

K_v – температурний коефіцієнт напруги розімкнутого кола.

Готове рівняння для фотовольтаїчної системи буде виглядати таким чином [14]:

$$I = I_{pv} N_p - I_0 N_p \left[e\left(\frac{V + IR_s\left(\frac{N_s}{N_p}\right)}{\alpha V_T N_S} \right) - 1 \right] - \left[\frac{V + IR_S\left(\frac{N_s}{N_p}\right)}{R_p\left(\frac{N_s}{N_p}\right)} \right] \tag{2.9}$$

де N_s – загальна кількість комірок, з’єднаних послідовно;

N_p – загальна кількість комірок, з’єднаних паралельно.

Еквівалентна модель схеми фотовольтаїчного приладу можна змоделювати за допомогою MATLAB/Simulink, фотоелектрична батарея спроектована зі спеціальними характеристиками для отримання 250 Вт, як показано на рис 2.3.

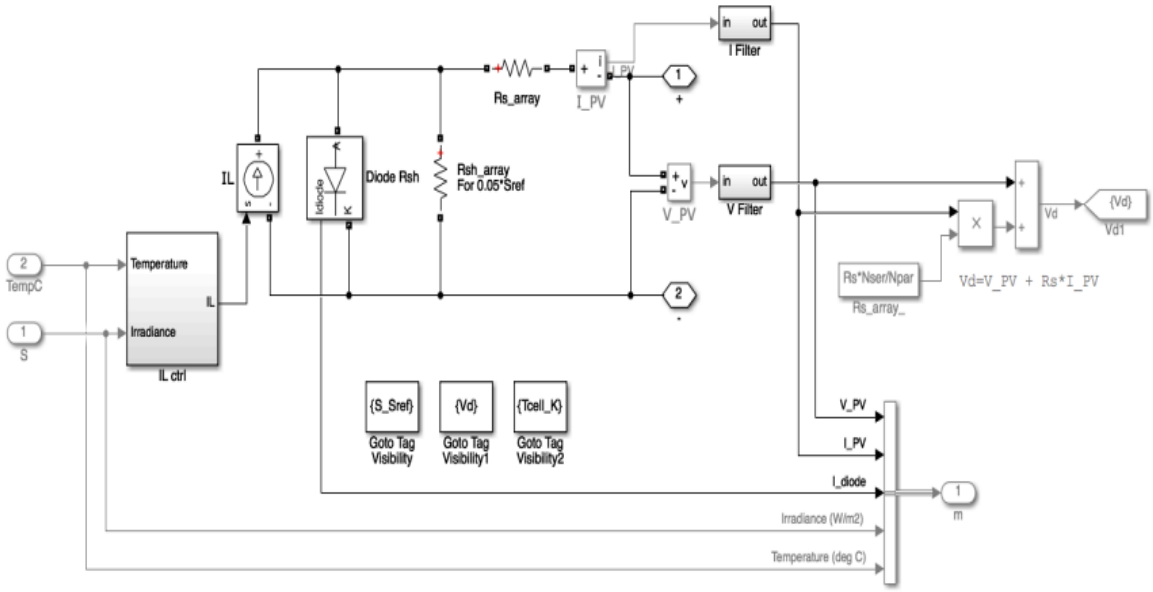


Рисунок 2.5 – Еквівалентна схема фотопанелі, що змодельована у програмі Simulink

Дані для програми взяті з дійсних значень фотопанелі, що наведено у табл. 2.1.

Таблиця 2.1 – Дані фотопанелі [14]

Параметр моделі	Значення
Назва модуля	1Soltech 1STH-250-WH
Паралельних з’єднань	1
Послідовних з’єднань	1
Максимальна потужність	250,2 Ват
Напруга розімкнутого кола	37,3 В
Максимальна потужність напруги	30,7 В
Струм короткого замикання	8,66 А
Максимальна потужність струму	8,15 А

Експериментальні дані завжди надаються з посиланням на STC або NOCT. Іноді виробники фотоелектричних пристроїв спрощують коригування математичних рівнянь P-V та I-V, надаючи криві P-V та I-V для різних умов температури та інтенсивності сонячного випромінювання [12].

Фотоелектричний прилад складається з багатьох окремих фотоелектричних елементів, які з’єднані між собою для отримання достатньої вихідної потужності. Характеристики фотоелектричної батареї можна представити шляхом множення струму на загальну кількість паралельно з’єднаних фотоелектричних елементів і множення напруги окремого фотоелектричного елемента на загальну кількість послідовно з’єднаних фотоелектричних елементів. Характеристики струмів при напрузі, а також струмів потужності – практичних фотоелектричних пристроїв варіюються від однієї моделі до іншої. Три точки на характерній кривій фотоелектричного

пристрою вважаються основними: коротке замикання, розімкнуте коло і точки максимальної потужності, як показано на рис. 2.4.

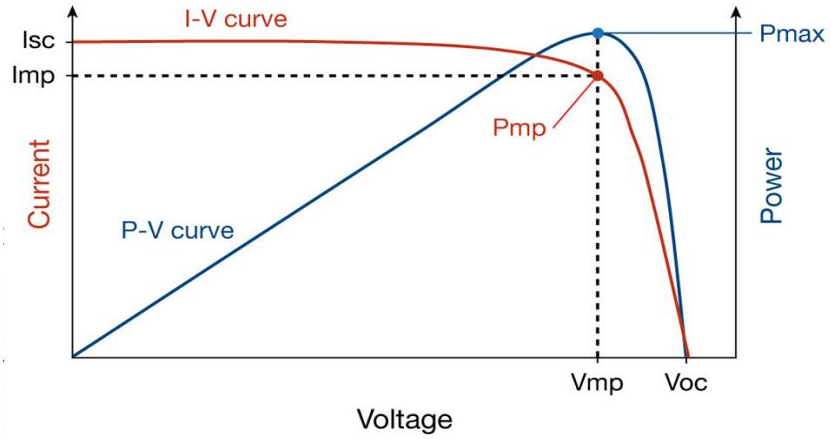


Рисунок 2.6 – Характеристика струмів фотоелектричної панелі: червоним – струм напруги, синім – струм потужності

Виробники фотоелектричних пристроїв надають технічні характеристики для всіх типів фотоелектричних пристроїв. Технічні характеристики містять основну експериментальну інформацію про електричні характеристики фотоелектричних пристроїв.

У технічних характеристиках фотоелектричних пристроїв можна знайти таку інформацію:

– Номінальний струм короткого замикання ($I_{\frac{SC}{N}}$).
– Номінальна напруга розімкнутого кола ($V_{\frac{OC}{N}}$).
– Струм у точці максимальної потужності (I_{mp}).
– Напруга у точці максимальної потужності (V_{mp}).
– Температурний коефіцієнт струму короткого замикання (K_I).
– Температурний коефіцієнт напруги розімкнутого кола (K_V).
– Експериментальна максимальна потужність ($P_{max,e}$).

Іншим важливим фактором характеристик фотоелектричних пристроїв є коефіцієнт заповнення. Коефіцієнт заповнення описує ступінь квадратності

кривої I-V і представлений як відношення двох площ, як на рис. 2.5. Крім того, він є показником продуктивності напівпровідника фотоелектричної комірки [12]. Будь-яке погіршення, що знижує коефіцієнт заповнення, також знижує вихідну потужність за рахунок зменшення (I_{mp}) або (V_{mp}).

Коефіцієнт заповнення визначається як тіньова область, поділена на заштриховану область, і виражається наступним рівнянням:

$$FF = \frac{P_{mp}}{V_{OC}I_{SC}} = \frac{V_{mp}I_{mp}}{V_{OC}I_{SC}} \tag{2.10}$$

Коефіцієнт заповнення завжди менше абсолютного значення [FF > 1] і залежить від напівпровідникового матеріалу [14]. Фотоелектрична батарея може забезпечити більшу потужність, коли значення коефіцієнта заповнення наближається до одиниці.

Що в свою чергу утворює графік залежності, як на рис. 2.7:

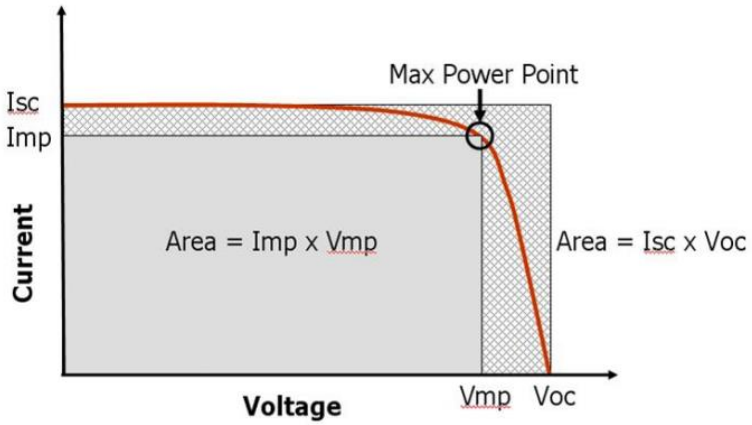


Рисунок 2.7 – Характеристики фотоелектричного модуля, що показують коефіцієнт заповнення

Від цього практично отримують вольт-амперні характеристики та характеристики потужності для фотопанелі, як показано на рис. 2.6 та рис. 2.7.

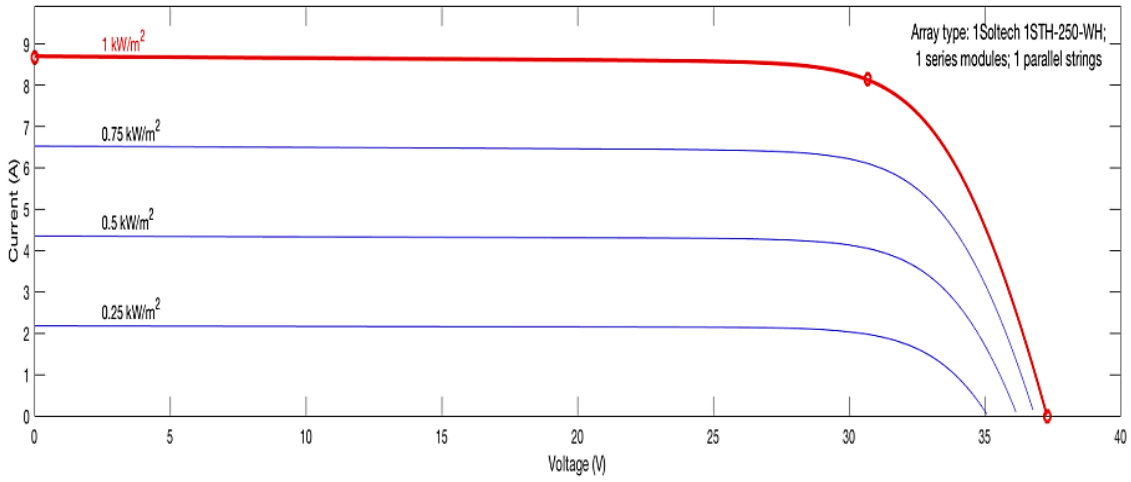


Рисунок 2.8 – Вольт-амперні характеристики при різній інтенсивності сонячного випромінювання для фотоелектричного пристрою 1Soltech 1STH-250-WH

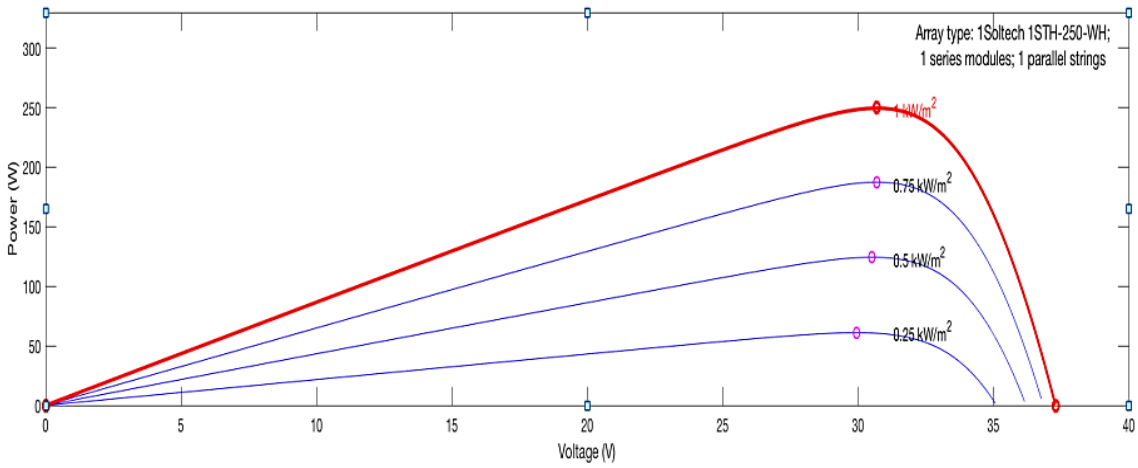


Рисунок 2.9 – Характеристики потужності при різній інтенсивності сонячного випромінювання для фотоелектричного пристрою 1Soltech 1STH-250-WH

Одним з найважливіших факторів, що впливають на продуктивність фотоелектричної системи, є затінення. Затінення означає тінь на зовнішній поверхні фотоелектричних пристроїв, яка зменшує вихідну потужність системи. Фотоелектричний пристрій починає генерувати менше напруги або струму, коли він затінений. Той самий струм протікає через ланцюг, коли фотоелектричні пристрої з’єднані послідовно. Проте затінена частина не може генерувати той самий струм. Це означає, що область затіненої частини починає поводитися як навантаження і споживати енергію, коли фотоелектричні пристрої з’єднані послідовно.

Ця проблема може призвести до пошкодження усієї ACE. Тому для зменшення пошкоджень у таких умовах використовується обхідний діод, як показано на рис. 2.10, блок-схемі фотоелектричної батареї в затіненому стані [14].

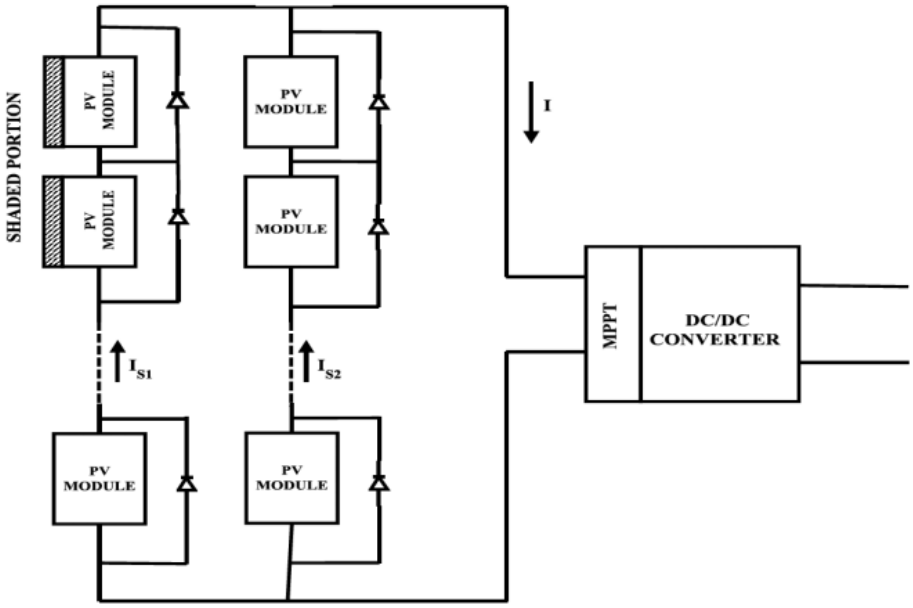


Рисунок 2.10 – Схема сонячної електростанції при затіненні з обхідним діодом

Характеристики фотоелектричних систем стають більш нелінійними і мають більше ніж одну точку максимальної потужності через часткове або повне затінення, тому в таких умовах MPPT стає складним завданням.

2.2.2.б Вітрогенератор

Близько 1% від загальної сонячної радіації, що надходить на Землю, перетворюється на енергію вітру. Вітер можна визначити як природний рух обсягів повітря, який визначається його швидкістю та напрямком. Цей рух виникає внаслідок різниці атмосферного тиску, що утворюється в результаті сонячного нагрівання різних ділянок земної поверхні. Отже, вітер можна вважати непрямою формою сонячної енергії. Хоча повітря рухається як горизонтально, так і вертикально, вітром вважається лише його горизонтальний рух [12, 14].

Для отримання вітряної енергії, використовують вітрогенератор, який перетворює кінетичну енергію вітру в обертальний рух, редуктор для

регулювання обертального руху до швидкості генератора для досягнення бажаної потужності, та вітротурбіна, яка застосовується для перетворення механічної енергії в електричну.

В автономних системах, енергія, що виробляється генератором, проходить через контролер перетворення потужності, це забезпечує стабілізацію напруги і частоти, але також вказує на обмеження швидкості обертання і захист від перевантажень. Далі, електроенергія направляється або в акумуляторну батарею через DC-коло, або безпосередньо до навантаження через інвертор, що формує синусоїдальну напругу необхідних параметрів.

Для підтримки роботи, енергопостачання в складі комплексних АСЕ, вітрогенератор працює спільно з сонячними модулями і резервним генератором. Контролер управління (EMS або PCS) розподіляє пріоритети отриманої енергії: при наявності вітру – максимальне використання вітряка; при його нестачі – перемикання на PV або запуск РГ.

Крім того, вона включає випрямляч для перетворення змінного струму в постійний, перетворювач постійного струму в постійний та контролер MPPT для отримання MPP, блок-схема вітроенергетичної системи представлена на рис. 2.8.

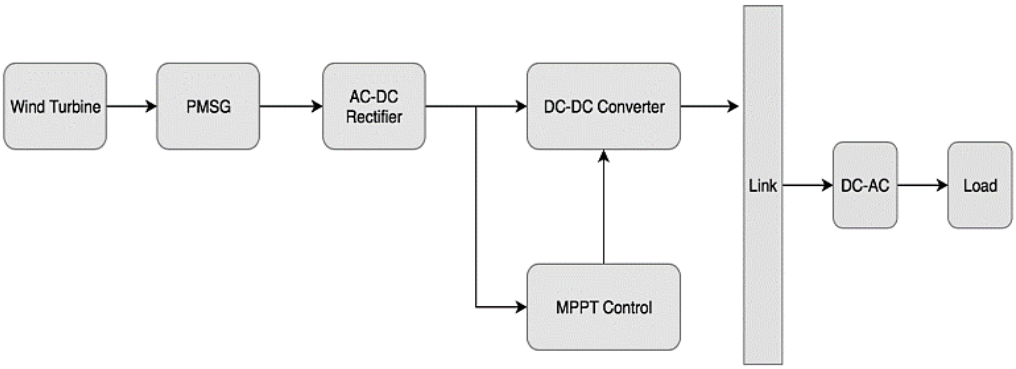


Рисунок 2.11 – Блок-схема елементів контролю для вітрогенератора

Вітрові турбіни використовуються для перетворення енергії вітру і класифікуються за напрямком їх осей відносно вітряного потоку. Існують різні моделі вітрових турбін, які класифікуються за двома основними категоріями: турбіни з горизонтальною і вертикальною віссю. Турбіни з горизонтальною

віссю найчастіше використовуються як у великомасштабному, так і в дрібномасштабному виробництві енергії [14].

Основна ідея вітрової турбіни полягає в тому, щоб виробляти електроенергію з механічного впливу, який виникає від кінетичної енергії вітру, що подається в електричну мережу або споживається навантаженням. Вітрова турбіна складається з вежі, лопатей ротора, що обертаються навколо маточини, та редуктора, встановленого всередині гондоли [14].

Мета лопатей турбіни полягає у використанні кінетичної енергії вітру та передачі її до генератора. Потужність вітру (P_W) у певній місцевості визначається за допомогою наступного рівняння [9, 10, 11, 14, 15]:

$$P_W = \frac{1}{2}\rho A v_w^3 \tag{2.11}$$

де ρ – це щільність повітря, $\frac{\text{кг}}{\text{м3}}$;

А – площа охоплення турбіни, м^2;

v_w – швидкість вітру, $\frac{\text{м}}{\text{с}}$.

Але турбіна захоплює лише частину цієї енергії, тому не всю енергію вітру можна використовувати. Згідно із законом Беца, теоретичний максимальний коефіцієнт корисної дії вітрової турбіни становить 59,3%. Багато невеликих вітрогенераторів (менше 4 кВт), що представлені на ринку, мають ККД 20%; однак відповідний вітрогенератор з лопатями, що мають хорошу аеродинаміку, може мати ККД до 40% [14, 15].

Отже, значення ККД варіюється від турбіни до турбіни. Розрахунок потужності для вітротурбіни зводиться до знання крутного моменту, який він розвиває на рівні ротора, і того, що він витягує енергію від повітряних мас [14, 15]:

$$P_m = P_W C_p(\lambda) \tag{2.12}$$

$$P_m = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot S_p \cdot C(\lambda, \beta) \cdot v_w^3 \tag{2.13}$$

де P_m – потужність повітряних мас;

ρ – питома щільність повітря;

$S_{\text{р}} = \pi R^2$ – робоча площа лопатей турбіни; R – довжина лопатей;

C – коефіцієнт потужності;

v_w – швидкість переміщення повітряних мас.

Швидкохідність турбіни визначають таким чином [14, 15]:

$$\lambda = \frac{\omega_r R}{v_w} \tag{2.14}$$

Номінальна швидкохідність λ_n залежить від конструкції ВГ. Синхронна швидкохідність λ_0 визначається при $\mathrm{C} = 0$. Загальне рівняння при значеннях $\lambda_n < \lambda < \lambda_0$, використовується для моделювання характеристик вітрової турбіни у вигляді:

$$C = C_{max} \cdot \left(\frac{\lambda}{\lambda_n}\right)^2 \left[-2\left(\frac{\lambda}{\lambda_n}\right) + 3\right] \tag{2.15}$$

Також, обертаючий момент турбіни можна виразити як:

$$T = \frac{1}{2} C_t(\lambda, \beta) \rho A R v_w^2 \tag{2.16}$$

де $C_t(\lambda, \beta)$ є коефіцієнтом крутного моменту вітрогенератора і може бути визначений як:

$$C_t(\lambda, \beta) = \frac{C_p(\lambda, \beta)}{\lambda} \tag{2.17}$$

Крім того, коефіцієнт турбіни C_p визначається за допомогою коефіцієнта швидкості кінцівки λ та кута нахилу лопаті β за наступним рівнянням, кофіцієнти для C_i вказані в таблиці 2.2 [14]:

$$C_p(\lambda, \beta) = C_1\left((C_2 \lambda_1^{-1}) - (C_3 \beta - C_4)\right)\left(e^{-C_5 \lambda_1^{-1}}\right) + (C_6 \lambda) \tag{2.18}$$

Таблиця 2.2 – Коефіцієнти значень C_i [14]:

i	1	2	3	4	5	6
C_i	0,5176	116	0,4	5	21	0,0068

За даними кофіцієнтами отримують таке рівняння:

$$0{,}035(1+\beta^3)^{-1}+(\lambda+0{,}08\beta)^{-1}=-\lambda_1^{-1} \qquad (2.19)$$

Криві C_p- λ для різних кутів нахилу показані на рис. 2.3. Найвище значення C_p отримується при $\beta = 0$, і номінальному значенні коефіцієнта швидкості кінчика лопаті λ.

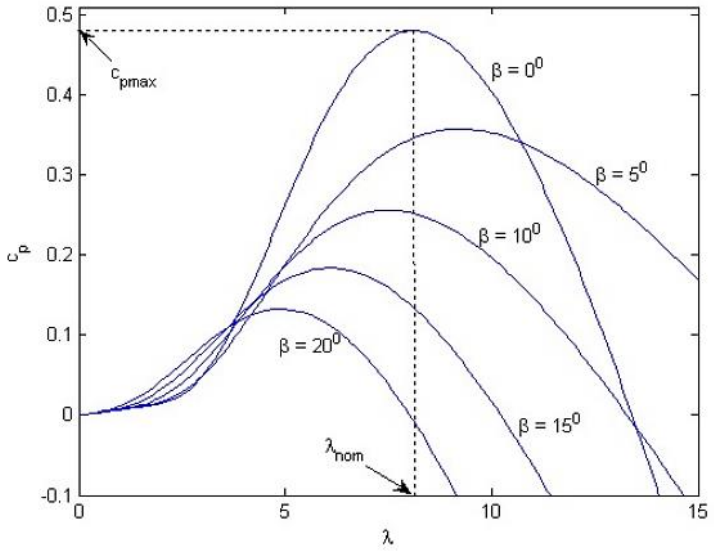


Рисунок 2.12 – Характеристики C_p-λ вітрових турбін для різних значень кута нахилу β.

За допомогою MATLAB/Simulink вітрогенератор проектують зі спеціальними характеристиками для отримання 250 Вт, як показано на рис. 2.4 і табл. 2.3. На рис. 2.5 показано характеристики потужності турбіни при $\beta = 0$.

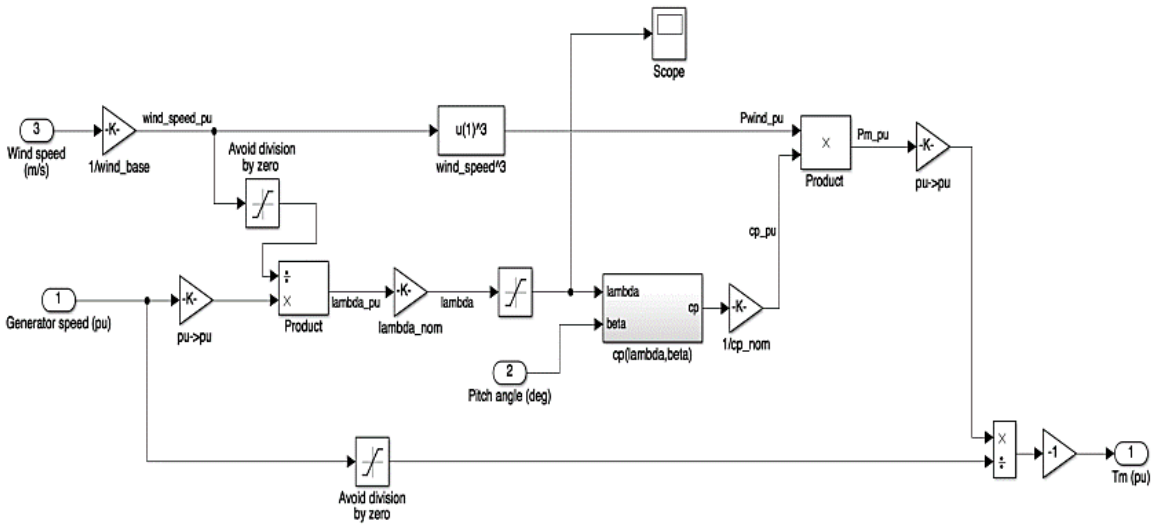


Рисунок 2.13 – Еквівалентна схема вітрогенератора, що змодельована у програмі Simulink

Таблиця 2.3 – дані вітрогенератора для еквівалентної системи [14]

Параметр	Значення
Номінальна вихідна потужність	2500 Ватт
Базова потужність електричного генератора	2500/0,9 ВА
Номінальна швидкість вітру	≈12 м/с
Максимальна потужність при базовій швидкості вітру	0,8 (на одиницю номінальної механічної потужності)
Номінальна обертальна швидкість	1 повний оберт

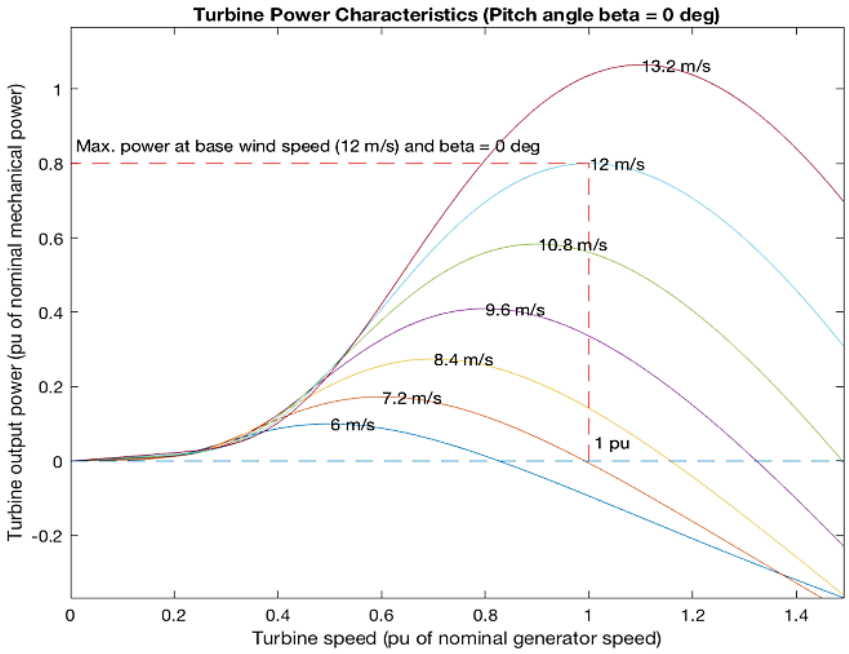


Рисунок 2.14 – Характеристики потужності вітротурбіни при β = 0

Контроль аеродинамічних систем має велике значення для регулювання механічної потужності. Регулювання кута нахилу є найпопулярнішим методом регулювання крутного моменту вітрогенератора. Коли швидкість вітру нижча за номінальне значення, кут нахилу майже дорівнює нулю, а коли швидкість вітру зростає, кут збільшується. Регулятор кута нахилу має значний вплив на коефіцієнт продуктивності вітрогенератора та значення крутного моменту турбіни [14, 15].

Як показано на рис. 2.5, швидкість ротора додається до номінальної швидкості для отримання вихідного значення кута нахилу, який впливає на коефіцієнт корисної дії вітрогенератора [14, 15].

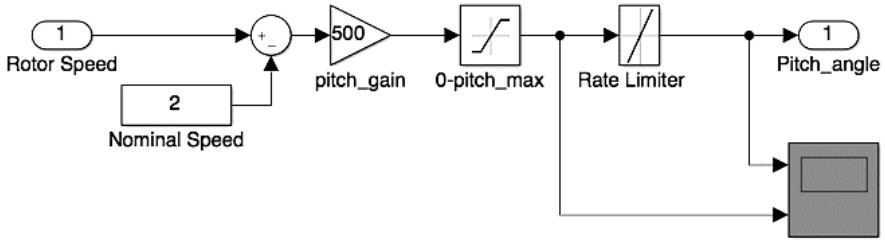


Рисунок 2.15 – Схема для регулятора кута нахилу, що зроблена у Simulink

2.2.2.в Резервний генератор на вуглецевому паливі

В автономних енергосистемах широко застосовуються стаціонарно розміщені дизельні генераторні установки з місцевим управлінням, які розташовуються в спеціально відведених приміщеннях. Потужність генератора визначається відповідно до розрахункового електричного навантаження будівлі. Залежно від конструкції, запуск генератора може здійснюватися вручну за допомогою тросового механізму або пускового пристрою. У разі стартера передбачається наявність акумуляторної батареї.

Захист дизельного генератора від несправностей та перевантажень забезпечує автоматичний вимикач або спеціалізована електронна система моніторингу із максимальним захистом.

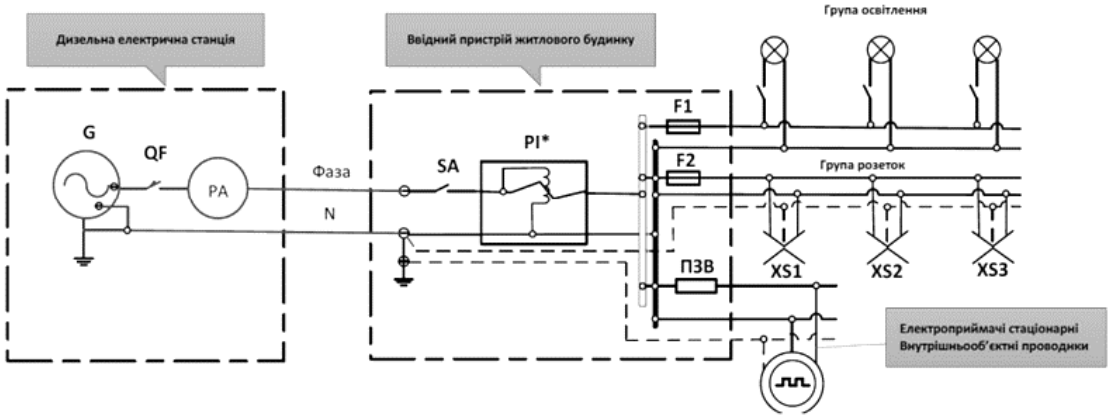


Рисунок 2.16 – Схема живлення житлового приміщення від електростанції дизельного типу з напругою 220 В, де: G – генератор; QF – автоматичний вимикач; PA – амперметр; SA - пакетний вимикач; PI – лічильник активної енергії; F1, F2 – запобіжники; ПЗВ – пристрій захисного відключення [8]

Генератори можна класифікувати за типами струму. Існують генератори змінного та постійного струму. В обох випадках генерована напруга є змінною. Її можна перетворити на постійний струм, додавши комутатор. Також генератори змінного струму можна класифікувати за швидкістю обертання

ротора. Існує два типи генераторів змінного струму, які підходять для вітрової енергетики: синхронні генератори, які є машинами з постійною швидкістю, та асинхронні генератори, які є машинами зі змінною швидкістю.

Хоча для вітроенергетичної системи підходять індукційні генератори з подвійним живленням і синхронні генератори з постійними магнітами, для зменшення вимог до постачання буде використовуватися РГ синхронного типу [14].

Роль РГ полягає в постачанні електроенергії, коли вихідна потужність фотоелектричної системи недостатня для забезпечення навантаження. Вихідна потужність РГ відображена відповідно в рівнянні [9, 14]:

$$P_{RG}(t) = P_l(t) - P_{PV}(t) \tag{2.16}$$

де $P_{RG}(t)$ – вихідна потужність РГ в момент часу t, кВт;

$P_l(t)$ – потреба в електроенергії/навантаження в момент часу t, кВт;

$P_{PV}(t)$ – Вихідна потужність фотоелектричної батареї в момент часу t, кВт.

Рівняння для споживання палива РГ, відповідно, буде мати наступний вигляд:

$$F_{RG}(t) = a \cdot P_{RG}(t) + b \cdot P_{RG}(t)^2 \tag{2.17}$$

де $F_{RG}(t)$: швидкість – споживання палива в момент часу t (літри/година або кг/година),

a, b – коефіцієнти споживання палива (константи, що залежать від генератора).

У синхронно обертовій системі відліку, d-q модель РГ синхронного типу можна виразити наступними рівняннями [14]:

$$\frac{d}{dt} i_d = \frac{1}{L_d} v_d - \frac{R_s}{L_d} i_d + \frac{L_q}{L_d} p w_m i_q \tag{2.18}$$

$$\frac{d}{dt} i_q = \frac{1}{L_q} v_q - \frac{R_s}{L_q} i_q + \frac{L_d}{L_q} p w_{m_d} - \frac{\lambda p w_m}{L_q} \tag{2.19}$$

$$T_e = \frac{3}{2} p\left[\lambda i_q + \left(L_d - L_q\right) i_d i_q\right] \tag{2.20}$$

де L_d, L_q – індуктивність генератора на осі d-q;

R_s – опір статора, Ом;

i_d, i_q – відповідно струми на осі dq;

v_q, v_d – напруги на осі dq;

w_m – кутова швидкість ротора;

λ – амплітуда індукованого потоку;

p – кількість пар полюсів;

T_e – електромагнітний момент.

Модель синхронного генератора розроблено з використанням MATLAB/Simulink, як показано на рис. 2.6, з певними технічними характеристиками, як показано в табл. 2.4.

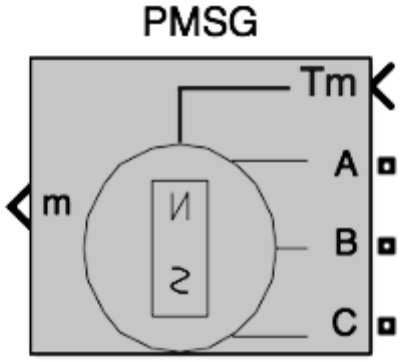


Рисунок 2.16 – Модель синхронного генератора з постійними магнітами в програмі Simulink

Таблиця 2.4 – Дані для моделі синхронного генератора [14]

Параметр	Значення
Опір фази статора	0,05 Ом
Індуктивність якоря	$635 * 10^{-6}$
Індекс зв'язку я/с	0,192 В·с
Інерція	0,011 кг·м^3
В'язке демпфування	$1{,}889 * 10^{-6}$ Н·м·с
Кількість пар полюсів	4

2.2.3 Акумуляторна система

Системи накопичення енергії акумуляторів є важливою частиною системи для якісної оптимізації, оскільки вони дозволяють зберігати електричну енергію для подальшого використання в разі потреби. Це робить їх особливо корисними для інтеграції ВДЕ в енергетичну мережу. Таким чином, СНЕА можуть збалансувати мінливість виробництва енергії з відновлюваного джерела і забезпечити електроенергію, коли попит високий або коли виробництво електроенергії низьке.

СНЕА мають ряд переваг перед іншими формами накопичення енергії. По-перше, вони високоефективні та можуть накопичувати велику кількість енергії. По-друге, вони легко керовані за потужністю (передачею електроенергії) та можуть використовуватися в різноманітних програмах, включаючи системи резервного живлення та системи управління енергією [9, 10, 12, 14].

Крім того, СНЕА мають довший термін служби, ніж інші форми зберігання енергії, і менш схильні до поломок. Методи оптимізації є основоположними для досягнення ефективної та надійної системи управління та зберігання енергії. Ці методи полягають у розробці відповідних стратегій для збалансування виробництва електроенергії та попиту на навантаження, навіть якщо використовуються невизначені відновлювані джерела. Це досягається завдяки

використанню алгоритмів керування, які можуть передбачити доступність відновлюваної енергії та відповідно регулювати навантаження. Крім того, ці методи також можуть допомогти оптимізувати використання систем зберігання енергії, таких як СНЕА, щоб забезпечити ефективне та ефективне зберігання та вивільнення енергії. Загалом, вибір правильної техніки оптимізації має вирішальне значення для максимізації енергоефективності та стабільності системи. Підходи до моделювання та оптимізації, можна класифікувати на інтелектуальні методи, ітераційні методи та обчислювальні методи.

Акумуляторна батарея є пристроєм для зберігання надлишкової електричної енергії, який може використовуватися як джерело живлення. У цій роботі акумуляторна система підключена до контролера нечіткої логіки (КНЛ), а також до фотоелектричної та вітрових електростанцій. КНЛ використовується для регулювання потоку енергії в усій гібридній системі. Потік енергії в акумуляторній системі повинен бути багатонаправленим. Тому для заряджання та розряджання акумулятора при надлишку або дефіциті енергії необхідний двонаправлений перетворювач [14].

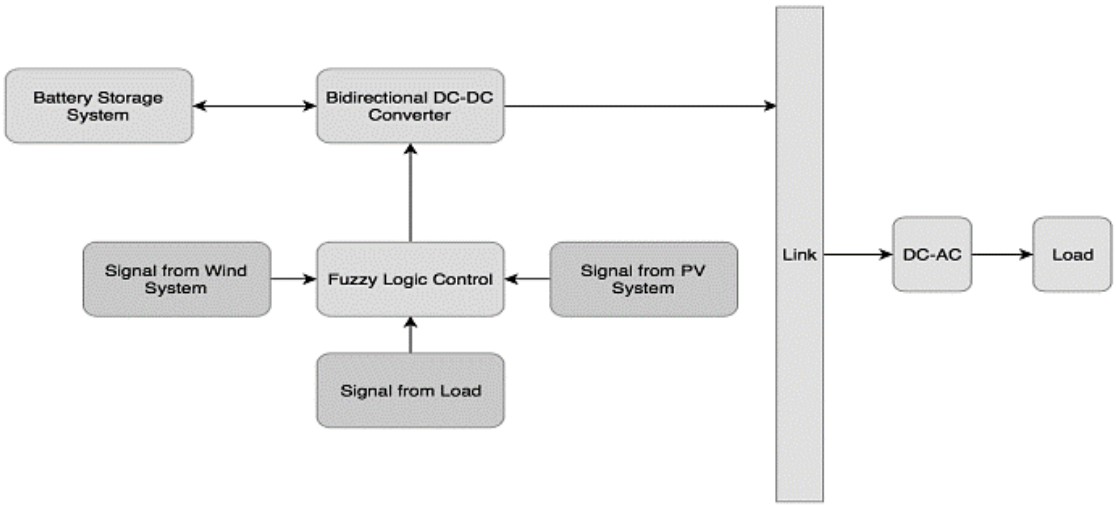


Рисунок 2.17 – Блок-схема контрою для системи акумуляторних батарей

Акумулятор складається з двох або декількох електрохімічних елементів, що дозволяє перетворювати хімічну енергію в електричну. Існують різні типи

акумуляторів, що залежать від використовуваних хімічних речовин, таких як нікель-металгідридний (Ni-MH), свинцево-кислотний, літій-іонний (Li-ion), літій-полімерний та нікель-кадмієвий (Ni-Cd) [12, 14].

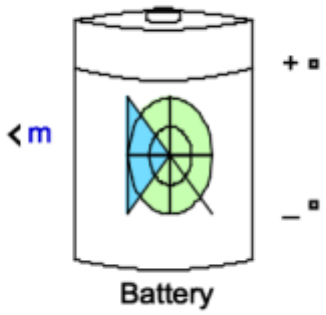


Рисунок 2.18 – Програмний об’єкт, що імітує акумуляторну систему ACE в програмі Simulink

Акумулятори на основах літію (Li-ion, літій-полімер) мають найкращі показники з погляду ефективності, довговічності та глибини розряду, хоча й потребують більших фінансових вкладень. В автономній системі, орієнтованій на довгострокову експлуатацію, доцільно обрати літієві акумулятори ємністю ≈20 кВт·год для забезпечення добового резерву енергії, з урахуванням середньодобового споживання будинку на рівні 30-35 кВт·год.

Розрахунок ємності акумуляторної системи здійснюється за формулою:

$$C_{as} = \frac{E_d \cdot n}{V_{as} \cdot \eta} \tag{2.21}$$

де C_{as} – потрібна ємність батареї, А·год;

E_d – добове споживання, кВт·год;

n – тривалість автономної роботи без генерації, сутки;

V_{as} – номінальна напруга акумуляторної системи, В;

η – ККД акумуляторів.

Як показано на рис. 2.19, характеристики розряду акумулятора для номінального струму розряду в 1 А порівняно з іншими струмами розряду в 2, 4 і 6 А.

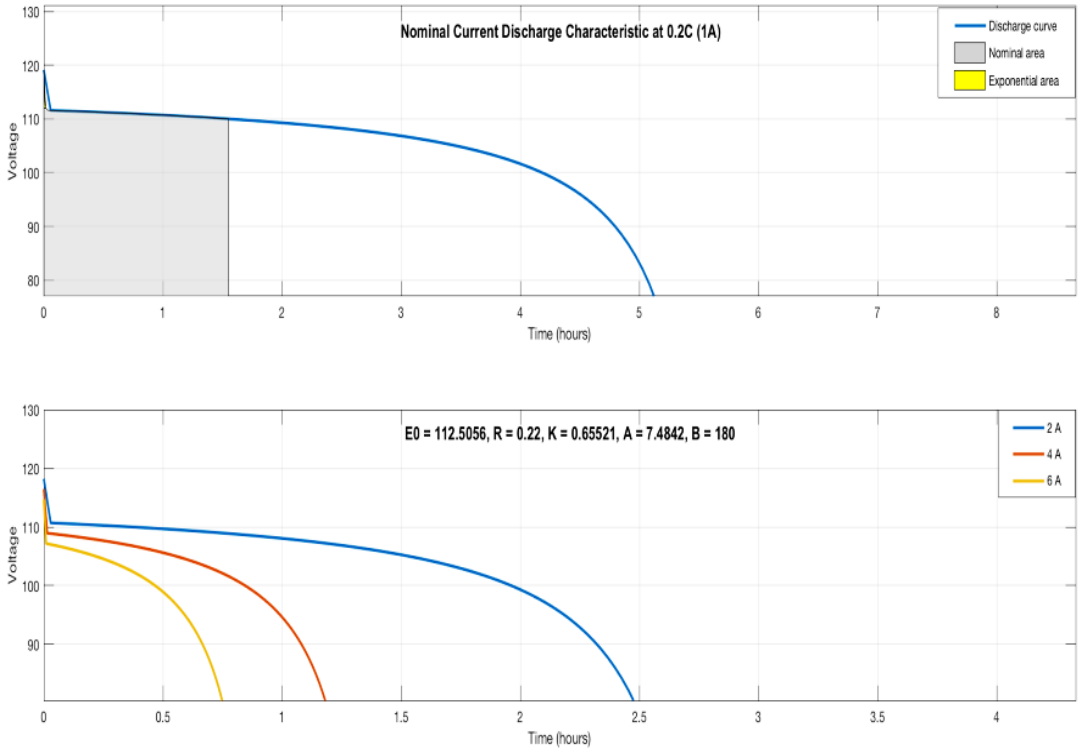


Рисунок 2.19 – Характеристики розряду акумулятора

2.2.4 Перетворення та керування отриманою електроенергією ACE

В автономній системі електропостачання перенаправлення і контроль потоків електричної енергії здійснюються через сукупність керуючих і силових елементів, що формують замкнуту енергетичну архітектуру. Основним вузлом управління виступає контролер енергетичного обміну EMS, який отримує дані про потужність генераторів, рівень заряду акумуляторних батарей, поточне навантаження і стан резервних установок. На основі цих параметрів контролер розподіляє енергію між джерелами, споживачами і накопичувачем, вибираючи пріоритетні потоки в залежності від умов роботи. Такий підхід дозволяє підтримувати стабільність напруги і частоти, запобігати перевантаженням і оптимізувати використання відновлюваних джерел.

Контроль і перенаправлення електроенергії забезпечується декількома ключовими елементами схеми АСЕ. Контролери заряду (MPPT для сонячних панелей, спеціалізовані конвертери для вітрогенераторів) оптимізують перетворення енергії зовнішніх джерел і забезпечують коректну подачу її в шину постійного струму. Акумуляторна система приймає надлишок енергії і віддає її при нестачі генерації, регулюючись через DC-DC або DC-AC перетворювачі.

Інвертор виконує функцію формування змінного струму для навантаження і одночасно бере участь у стабілізації параметрів мікромережі. У системах з резервним дизельним генератором застосовуються автоматичні пристрої введення резерву (АВР) і синхронізатори, які включають генератор тоді, коли можливостей ВДЕ недостатньо. У сукупності ці елементи забезпечують гнучке, адаптивне та енергоефективне управління всією автономною системою.

2.2.4.а Інвертор

Інвертор – це силовий електронний пристрій, що використовується для перетворення змінного струму в постійний, і класифікується на керовані та некеровані випрямлячі. Некеровані інвертори складаються тільки з діодів, а керовані інвертор – з тиристорів або транзисторів. Оскільки діод не має затвора, його неможливо керувати за допомогою керуючого сигналу. Трифазний діодний інвертор складається з шести діодів і застосовується для перетворення вихідної напруги змінного струму синхронного генератора у напругу постійного струму, як показано на рисунку 2.20.

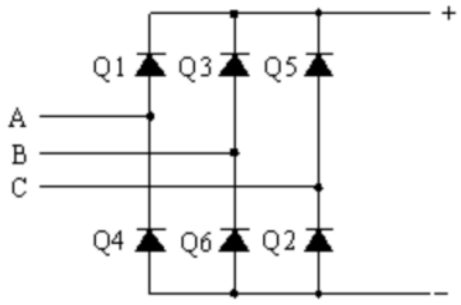


Рисунок 2.20 – Схема трифазного діодного інвертора

Алгоритм інкрементальної провідності є однією з найпопулярніших технологій для відстеження максимальної потужності у фотоелектричних системах. Для застосування цього методу у вітроенергетичній системі необхідний інвертор постійного струму. Тому буде використовуватися підвищувальний перетворювач постійного струму. Основна ідея алгоритму інкрементальної провідності для вітроенергетичної системи полягає в тому, що коли максимальна потужність досягається при певній швидкості вітру.

Некерований випрямляч перетворює вихідну потужність змінного струму РГ у форму постійного струму. Тому напругу постійного струму можна визначити за таким рівнянням:

Двонаправлені інвертори постійного струму в постійний називаються так через їх здатність пропускати струм у двох напрямках. Перетворювачі цього типу використовуються в багатьох сферах, таких як джерела безперебійного живлення, системи акумуляторних батарей та системи відновлюваної енергії.

Двонаправлені інвертори постійного струму можна класифікувати на понижуючі та підвищувальні залежно від конструкції системи. Підвищувальні перетворювачі встановлюються на стороні низької напруги, а понижувальні – на стороні високої напруги. Загалом двонаправлені перетворювачі постійного струму поділяються на два основні типи залежно від ізоляції між входом і виходом: неізольовані та ізольовані [14].

Ефективність інвертора, як критичний параметр, визначає, наскільки ефективно він перетворює постійний струм в змінний. Він визначається як відношення вихідної потужності змінного струму $P_{AC_{out}}(t)$ до вхідної потужності постійного струму $P_{DC_{in}}(t)$. Фактичну вихідну потужність змінного струму можна обчислити, помноживши вхідну потужність постійного струму на ККД [9]:

$$P_{AC_{out}}(t) = \eta_{INV} \cdot P_{DC_{in}}(t) \tag{2.22}$$

де η_{INV} – ККД інвертора.

Таким чином, рівняння підкреслює важливість ефективності інвертора для максимізації корисної потужності змінного струму від джерела постійного струму, що безпосередньо впливає на загальну продуктивність енергетичної системи. Як правило, ефективність інверторів становить біля 98%. Інвертори в ACE використовують стратегії управління для регулювання вихідної потужності та управління взаємодією між вихідною потужністю фотоелектричних систем та розподілених джерел енергії. Ці стратегії управління зазвичай включають динамічні рівняння, які визначають, що інвертор реагує на зміни в попиті на електроенергію та умовах вхідної потужності. Наприклад, алгоритми відстеження точки максимальної потужності використовуються для оптимізації вихідної потужності фотоелектричних систем шляхом регулювання робочої точки інвертора відповідно до пікової вихідної потужності сонячних панелей.

У комбінованій автономній системі двонаправлений інвертор постійного струму використовується для заряджання та розряджання акумулятора залежно від надлишку та дефіциту енергії. Коли пропозиція перевищує попит, тобто є надлишок енергії, акумулятор заряджається, що дозволяє перетворювачу працювати в прямому напрямку. Коли пропозиція менше попиту, тобто є дефіцит енергії, батарея розряджається і починає постачати дефіцит енергії до навантаження. У цьому випадку інвертор починає працювати в зворотному напрямку. Направлений інвертор постійного струму підключається до батареї та подальшої передачі струму, як показано на рис. 2.21.

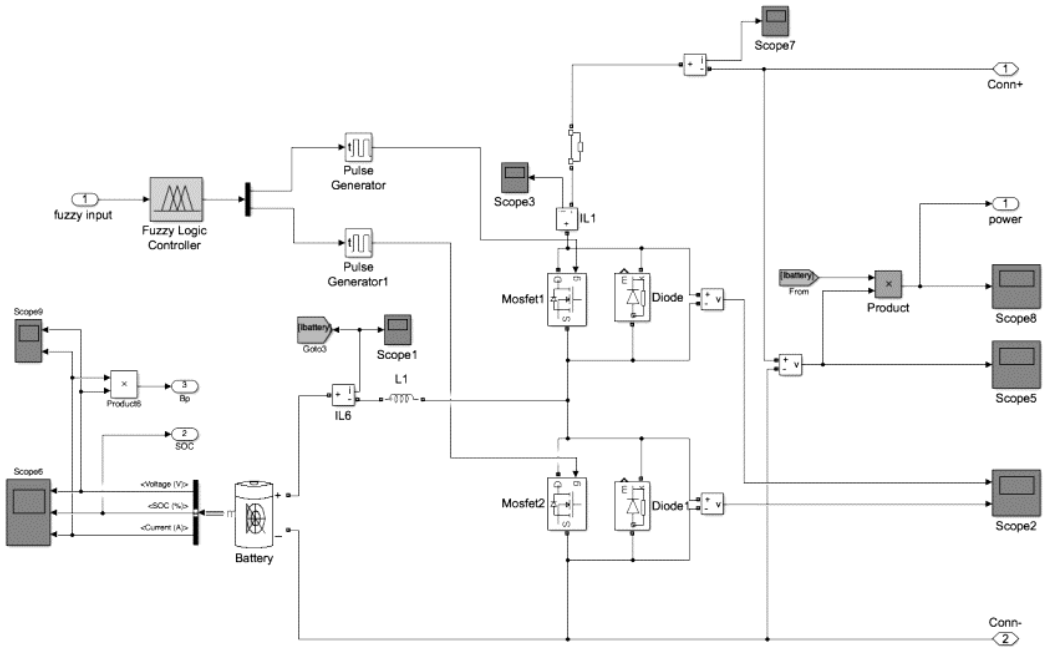


Рисунок 2.21 – Схематична модель двонаправленого інвертора постійного струму в постійний струм в Simulink

2.2.4.б Контролер

Контролер – це спеціалізований електронний модуль або сукупність модулів, які виконують функції управління, координації та оптимізації потоків енергії між усіма елементами системи: генераторами, акумуляторами, інверторами, резервними установками та споживачами.

Необхідною частиною фотоелектричної системи є відстеження точки максимальної потужності фотоелектричної батареї. Це електронна система управління, яка дозволяє отримати максимальну потужність від фотоелектричної системи. MPPT не є механічною системою, яка механічно приводить фотоелектричні батареї в рух, щоб змінити їхнє положення і направити їх прямо до сонця. Це повністю електронна система, яка здатна отримати MPPT шляхом зміни робочої точки фотоелектричних батарей [11, 14]. Зазвичай фотоелектричний модуль перетворює приблизно 40% сонячної радіації, що падає, в електричну енергію.

Основна ідея MPPT полягає в автоматичному виявленні максимального струму Imp або напруги Vmp, при яких повинні працювати фотоелектричні модулі, щоб отримати максимальну потужність $Pmpp$♠ за певних умов опромінення та температури. Найскладніша частина цієї операції відбувається в умовах часткового затінення, коли можна отримати кілька піків, і важко визначити абсолютний MPP [14].

Отже, для досягнення максимальної потужності фотоелектричного модуля необхідно використовувати алгоритми MPPT. Було вдосконалено та опубліковано різні технології для виявлення точки максимальної потужності. Ці методи відрізняються за кількома аспектами, такими як необхідні датчики, складність, вартість впровадження, швидкість, корекція відстеження та простота впровадження.

Найбільш поширеними алгоритмічними методами MPPT є [9, 14]:

- Збурення та спостереження (P&O);
- Інкрементальна провідність (INC);
- Фракційна напруга розімкнутого ланцюга;
- Фракційний струм короткого замикання;
- Нейронні мережі;
- Нечітка логіка;
- Інші.

Саме завдяки модифікованим алгоритмічним методам MPPT вдається покращити рівень енергоефективності ACE.

2.2.5 Споживач та графік споживання

Електричне навантаження споживачів залежить від виду виробництва, режиму робочого дня і числа змін. Наочне уявлення про характер зміни електричних навантажень в часі (зміна, доба, місяць, рік) дають графіки

навантажень. Від певного електричного навантаження визначають тип споживача (табл. 2.5) [15].

Побутові споживачі, як правило, характеризуються змінним споживанням протягом дня, з піковими навантаженнями вранці та ввечері, коли використовується деяка кількість електричних приладів (освітлення, побутова техніка, опалення та охолодження).

Комерційні споживачі (магазини, офіси, ресторани і т.д.) мають більш рівномірний графік споживання протягом робочого дня, з піковим навантаженням під час відкриття та роботи підприємства [15].

Промислові підприємства часто мають стабільне і високе споживання електроенергії, особливо у виробничі зміни. Піки споживання можуть виглядати як різкі підйоми та спади об'єму споживання, виникати залежно від виробничого процесу та використання важкого обладнання.

У таблиці 2.5 наведена загальна характеристика споживачів за їх типами. Завдяки такому формальному позначенню, можна відвести споживача до певного типу задля введення певного режиму роботи АСЕ на програмному рівні. Так, якщо до установки буде під'єднано, наприклад, два споживача різних типів, можна виділити, який конкретний споживач використовує електроенергії більше запланованого.

Таблиця 2.5 – Графіки споживання за типом споживача

Тип споживача	Пік навантаження	Зниження споживання
Побутовий споживач	Ранкові та вечірні години	Денний і нічний час
Комерційний споживач	Робочі години (9:00-18:00)	Вечірні та нічні години
Промислове підприємство	Час роботи виробничих ліній	Нічні зміни або вихідні дні

У роботі над розрахунками, графіком навантаження називається крива, що показує зміну навантажень за певний проміжок часу. За родом навантаження розрізняють графіки активного і реактивного навантаження, за тривалістю – добові і річні графіки навантажень. Кожен тип споживача має свій характерний

графік навантажень, який визначається технологічним процесом або режимом життєдіяльності людини. Якщо відкладати по осі абсцис години доби, а по осі ординат споживану в кожен момент часу потужність у відсотках від максимальної потужності, то отримаємо добовий графік навантаження.

Добовий графік навантаження: Найбільше можливе за добу навантаження приймається за 100%. При відомому розрахунковому максимумі навантаження P_{max} можна перевести типовий графік (Р, %) у графік навантаження даного промислового споживача в значенні активної потужності (Р, кВт) [15].

$$P_j = \frac{n\% \cdot P_{max}}{100\%} \tag{2.23}$$

де P_j – потужність навантаження в певний час доби, кВт;

$n\%$ – ордината відповідної ступені типового графіка, %;

P_{max} – максимальне навантаження, кВт.

Далі, по добовому графіку навантаження визначають:

– добова витрата енергії:

$$W_c = \sum_{i=1}^{24} P_j \cdot t_i \tag{2.24}$$

де t – тривалість i-ої ступені добового графіка, год;

– Середньодобове навантаження:

$$P_{cp} = \frac{W_c}{24} \tag{2.25}$$

– коефіцієнт заповнення графіка навантажень $K_{\text{зг}}$ характеризує ступінь нерівномірності режиму роботи АСЕ:

$$K_{\text{зг}} = \frac{P_{cp}}{P_{max}} = \frac{W_c}{24P_{max}} \tag{2.26}$$

Для планування річного споживання і вироблення електроенергії складають річні графіки навантаження за тривалістю і річні графіки зміни добових максимумів навантажень.

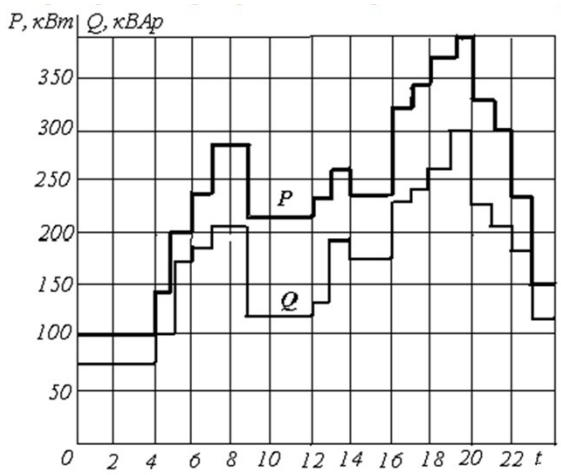


Рисунок 2.22 – Приклад добового графіку активного та реактивного навантажень

Річний графік навантаження: Для побудови необхідні дані за характерними добовими графіками двох найбільш завантажених днів в році-зимового і літнього, а при найбільш точній побудові ще й весняно-осінній графік навантаження.

Для більшої частини України можна умовно прийняти тривалість зимового періоду – 213 днів (жовтень-березень), літнього – 152 дні (квітень-вересень). На осі ординат річного графіка за тривалістю у відповідному масштабі відкладають навантаження в кВт от значень P_{max} до P_{min}, а по осі абсцис в масштабі-години року від 0 до 8760 год. (365 днів на рік по 24 години на добу: $24 \cdot 365 = 8760$ год).

Зазвичай для кожного споживача в довідковій літературі наводиться кілька добових графіків, що характеризують роботу підприємства в різний час року і в різні дні тижня. Найчастіше використовуються графіки зимових і літніх діб. Максимальне навантаження зимового добового графіка P_{max} приймається за 100%. Ординати всіх інших ступенів графіка задаються у відсотках щодо цього значення. За річним графіком навантаження можна визначити деякі коефіцієнти, що характеризують режим роботи підприємства.

Річна витрата активної електроенергії, за розглянутий період часу для підприємства дорівнює площі річного графіка:

$$W = \sum P_i \cdot t_i \tag{2.27}$$

де W – витрата активної електроенергії, кВт·год;

$P_i \cdot t_i$ – потужність (кВт) та тривалість часу (год) *i*-того ступеню графіка.

Число годин використання максимуму активної потужності можна визначити і за річним графіком активних навантажень:

$$T_M = \frac{W}{P_{max}} \tag{2.28}$$

$T_М$ – значення по кількостях годин на рік, в яких АСЕ повинна була б працювати з незмінним максимальним навантаженням, щоб спожити дійсно спожиту за рік кількість електроенергії, тобто:

$$T_М = К_{зг} \cdot 8760 \tag{2.29}$$

Середнє навантаження за рік:

$$P_{ср} = K_{зг} \cdot P_{max} \tag{2.30}$$

Частіше будують річні графіки за тривалістю. Такий графік являє собою криву зміни спадного навантаження протягом року (8760 год). Річний графік за тривалістю (рис. 2.23, б) можна побудувати за річним графіком, побудованим за середніми місячними потужностями (рис. 2.23, а) або двома характерними добовими графіками навантаження за зимову й літню добу.

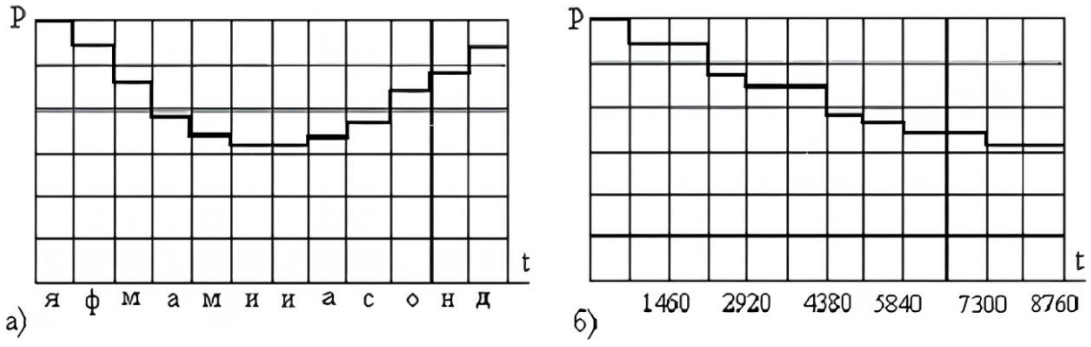


Рисунок 2.23 – Річний графік зміни активної потужності: а – за середніми потужностями за місяць; б – за тривалістю (год)

Споживачі підключаються до мережі через секції живильних ліній, які мають активно-індуктивні параметри. Довжина ліній передачі обмежується максимально допустимим відхиленням напруги на кінцевих споживачах від номінального значення. Відповідно до ДСТУ [6], граничне допустиме відхилення напруги не повинно перевищувати 10%. Таким чином, довжина лінії залежить від таких відомих факторів, як питомий опір провідника та величина переданого навантаження. Споживання електроенергії може бути контрольованим або введенням певного режиму споживання, або технічними засобами, або задіянням диференційних тарифів [15].

АСЕ надає енергію споживачу за умови, що його енергоспоживання не перевищує виробленої енергії. Споживачі електроенергії можуть працювати постійно або періодично, але також необхідно розглядати тип споживача [15]. Побутовий споживач є найчастішим споживачем, який більше за всі інші типи має можливість забезпечення автономною електричною системою, оскільки, наприклад, технологічні підприємства розташовуються ближче до електромережі та їхнє забезпечення в електроенергії стоїть у пріоритеті, ніж, житлові комплекси, але це не виключає введення додаткових електричних установок.

Комерційних та побутових споживачів можна масштабувати, у тому сенсі, що побутові електричні прибори, за їх пряме використання по наданому функціоналу, дають навантаження у часових рамках. Хоча й використання окремого фізичного споживача математично виглядає як сума ймовірностей використання окремих приборів, але при розгляді графіку споживання, можна розглянути періодично працюючі навантаження, що поділяються на фіксовані та плаваючі за часом (наприклад, постійно працюючий холодильник та увімкнення електричних чайників, мікрохвильові печі в обідні години). Ігнорування цих факторів може призвести до завищення вихідної потужності, і як наслідок, подорожчання АСЕ від встановлення доповненого обладнання, що може бути неоптимальним і недоцільним рішенням. Тому необхідно правильно визначити вихідну потужність такої установки, склавши графік добової зміни

навантаження, що відображає сумарну потужність всіх споживачів у кожен момент часу. Важливо унеможливити одночасну роботу потужних приладів і оптимізувати підключення навантажень так, щоб мінімізувати вихідну потужність АСЕ. Наприклад, СВЧ-піч слід вмикати тільки після завершення роботи електрочайника. Оскільки точне визначення інтервалів для навантажень із плаваючим часом роботи є важким, такі навантаження приймаються як постійно діючі.

Такі електроприлади, як холодильник, насоси, електродриль і низка інших, у момент пуску споживають потужність, що в 5-6 разів більша за «паспортну». Якщо таких споживачів з високою потужністю досить багато, то це може призвести до збільшення вихідної потужності. У цьому разі доцільно унеможливити одночасне вмикання таких електроприладів і здійснити споживання пускових потужностей від акумуляторних батарей [15].

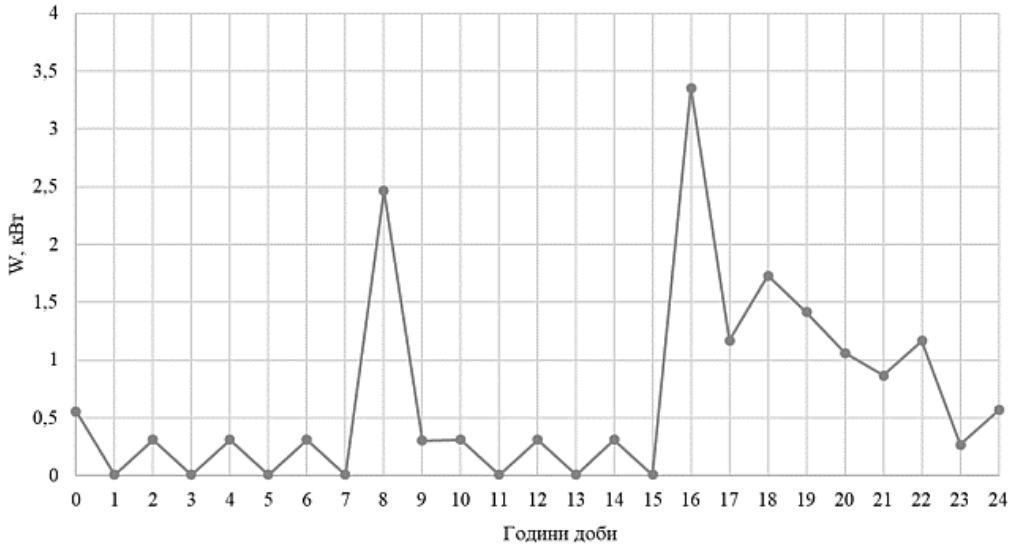


Рисунок 2.24 – Приклад добового графіку побутового споживача

Для розрахунку графіку споживання промисловим підприємством, у якості безпосередніх електроспоживачів виступають електричні прилади в будівлях, або машини на відкритому повітрі. В таблиці 2.24 наведений приклад встановленої потужності, що перенесені на окремі часові рамки доби (ранок, день, вечір, ніч), коли які використовується електроенергія.

2.2.6. Аналіз існуючих програмних рішень для симуляції та оптимізації комплексів АСЕ на основі ВДЕ

Сучасні програмні інструменти моделювання ВДЕ застосовуються для вирішення широкого спектра завдань при проектуванні та аналізі енергетичних систем.

Техніко-економічне обґрунтування – оцінка доцільності впровадження ВДЕ-комплексів з точки зору економічної ефективності та технічної здійсненності. На цьому етапі проводиться розрахунок необхідної потужності установок, вироблення електроенергії за рік, початкових інвестицій, експлуатаційних витрат та економічних показників (вартість кіловат-години, період окупності тощо). Моделювання дозволяє порівняти різні сценарії та конфігурації системи, визначити оптимальний склад обладнання з огляду на мінімізацію собівартості енергії або максимізацію прибутку. Результати такого техніко-економічного аналізу слугують базою для прийняття рішення щодо реалізації проекту.

Оптимізація структури системи енергопостачання – пошук найкращої конфігурації комплексної АСЕ (складу генеруючих джерел і накопичувачів) для досягнення заданих критеріїв оптимальності. Зазвичай критерії – мінімум приведеної вартості системи або тарифу на енергію, максимум частки відновлюваної енергії, забезпечення надійності живлення тощо. Програмні комплекси перебирають різні комбінації обладнання (сонячні панелі, вітротурбіни, резервні генератори, акумулятори тощо) і моделюють їх роботу протягом тривалого періоду (рік і більше) з кроком годину або менше. На основі цих симуляцій обирається конфігурація з найкращими показниками. Таким чином вирішуються задачі оптимального розміру та складу системи (найкращий баланс потужностей різних джерел) і задачі оптимального керування (стратегії заряд/розряд акумуляторів, черговість запуску генераторів).

Розрахунок генерації та продуктивності – імітація роботи ВДЕ-установок для прогнозування виробітку електроенергії за різних умов. Зокрема, для

сонячних електростанцій моделюється генерація фотоелектричних модулів за погодинними метеоданими (інсоляція, температура) з урахуванням кута нахилу панелей, затінення, характеристик інверторів тощо. Для вітрових турбін – розрахунок виробітку за профілем швидкості вітру, кривою потужності турбіни і висотою щогли. Програмні засоби прогнозування генерації дають змогу оцінити річний виробіток енергії, коефіцієнт використання встановленої потужності, вплив змін погоди або розташування. Це важливо як для техніко-економічних оцінок, так і для планування режимів роботи енергосистеми [14, 16].

Моделювання мікромереж – детальне симулювання роботи автономних або мережевих розподілених енергосистем, що містять кілька джерел енергії, накопичувачі та змінні навантаження. Моделювання мікромережі дозволяє проаналізувати взаємодію компонентів у часовому розрізі: баланс потужності в кожен момент, перетоки енергії між джерелами і накопичувачами, реагування на зміни навантаження або ресурсу (сонця, вітру), перемикання режимів мережа/острів. Такі симуляції необхідні для відпрацювання алгоритмів керування мікромережею, оцінки її надійності, частки ВДЕ в покритті навантаження, паливної економії (для комбінованих систем з генераторами) тощо [9, 10, 14, 16].

Аналіз стійкості та якості електроенергії – дослідження динамічної стійкості енергосистеми з ВДЕ та впливу ВДЕ-генерації на параметри якості електричної енергії. Динамічні моделі дозволяють перевірити стійкість системи при збуреннях (раптове відключення генератора, зміна навантаження, перехід мікромережі в ізольований режим) – оцінюється поведінка частоти та напруги, спрацювання автоматики, можливі коливання.

Іншим аспектом є якість електроенергії: наприклад, через інверторні джерела можуть виникати гармоніки напруги, коливання напруги при змінному сонячному ресурсі, проблеми з підтриманням заданої частоти в ізольованій мікромережі. Спеціалізоване програмне забезпечення дає можливість моделювати перехідні процеси, аналізувати спектр гармонік, перевіряти

відповідність показників якості стандартам. Це особливо важливо для великих ВДЕ-проектів, що приєднуються до мережі, де необхідно гарантувати стійкість роботи енергосистеми з високою часткою ВДЕ.

Зазначені завдання можуть вирішуватися послідовно або паралельно на різних етапах проектування. Як правило, на етапі концепції виконують спрощений техніко-економічний розрахунок і оптимізацію конфігурації, далі – детальне моделювання генерації та роботи системи, і на завершення – аналіз стійкості при інтеграції в електромережу (для промислових об’єктів). Для кожного типу задачі існують свої найбільш придатні програмні інструменти. Наприклад, для оптимізації систем часто використовують HOMER або подібні моделі, для прогнозу генерації – PVsyst, SAM, для аналізу електричних режимів – пакети електроенергетичного моделювання (PSS/E, PowerFactory тощо). Далі розглянуто ключові програмні засоби, що застосовуються у сфері симуляції та оптимізації ВДЕ-комплексів, та наведено їх порівняння за функціональними можливостями [18].

Нижче, в табл. 2.6 подано огляд найпоширеніших програмних рішень для АСЕ, які використовуються для моделювання, оптимізації та аналізу систем на базі ВДЕ. Кожен із наведених інструментів має свою спеціалізацію та сферу застосування.

Таблиця 2.6 – програми для модулювання АСЕ [18]

Програма	Розробник	Спеціалізація	Ліцензія	Інтерфейс	Ключові можливості
HOMER Pro	NREL (США), зараз HOMER Energy by UL	Оптимізація гібридних енергосистем, автономні/частково автономні системи	Комерційна (платна), закритий код	Графічний, зручний	Перебір комбінацій обладнання, економічний аналіз, чутливий аналіз, моделювання рік з кроком 1 год.
PVsyst	Університет Женеви (Швейцарія)	Моделювання фотоелектричних систем	Комерційна (платна), закритий код	Графічний, зручний	Повний цикл проектування PV, годинна симуляція, база даних метео/компонентів, аналіз втрат.
SAM	NREL (США)	Оцінка продуктивності та фінансів ВДЕ-проектів (PV, CSP, вітро, біомаса тощо)	Безкоштовна (freeware), частково відкритий код (ядро SSC)	Майстер вводу, графіки/таблиці, скрипти	Інженерне моделювання + фінансовий аналіз (LCOE, NPV), підтримка багатьох технологій.
TRNSYS	Університет Вісконсін-Медісон (США)	Транзієнтне моделювання енергосистем, динамічні процеси	Комерційна (платна), ядро закрите, але відкриті компоненти	Графічний (TRNSYS Studio) + числове ядро	Модульна структура, детальні перехідні процеси (секунди), власні модулі Fortran/C++.
MATLAB /Simulink	MathWorks	Моделювання електроенергетичних систем, силової електроніки, керування	Комерційна (платна), закритий код	Графічний (блок-схеми), потребує теорії	Бібліотека Simscape Power Systems, моделі ВДЕ, стійкість, алгоритми керування.

Продовження таблиці 2.6

OpenDSS	EPRI (США)	Симулятор розподільних мереж з ВДЕ	Безкоштовна (open-source code)	Текстовий скриптовий (Python/MATLAB), простий графічний	QSTS-моделювання, вплив ВДЕ на мережу (напруга, втрати, гармоніки).
PSS/E	Siemens PTI	Моделювання режимів електромереж (сталі/динамічні)	Комерційна (високовартісна), закритий код	Десктопний, скрипти Python	Розрахунок потоків, стійкості, коротких замикань, моделі ВДЕ, OPF.
DIgSILENT PowerFactory	DIgSILENT (Німеччина)	Комплексне моделювання електросистем (генерація, передача, розподіл)	Комерційна (платна), закритий код	Графічний (схеми, діалоги), скрипти DPL/Python, БД	Режими, захист, EMT-аналіз, моделі ВДЕ, Hardware-in-the-Loop.
Hybrid2	UMass за підтримки NREL (1990-і)	Симулювання автономних гібридів	Безкоштовна (freeware)	Графічний (старий Windows)	Детальна годинна модель з варіаціями, економічний аналіз, але застаріла.
RETScreen	Natural Resources Canada	Експрес-аналіз чистої енергетики	Безкоштовна базова, Expert-підписка; закритий код	Excel-подібний, простий	Енергетичний баланс, фінанси (NPV, IRR), ризик-аналіз, звіти.

Інженеру або досліднику, що займається проектами ВДЕ, важливо володіти декількома програмними інструментами і розуміти їх придатність для різних задач. На етапі концепції та економічного обґрунтування слід застосовувати швидкі моделі оптимізації (HOMER, RETScreen, SAM), для

детального інженерного проектування – вузькоспеціалізовані пакети (PVsyst для PV, PSS/E або PowerFactory для електромережевих розрахунків), а для наукового пошуку – гнучкі середовища (Matlab/Simulink, TRNSYS, OpenDSS). Комплексне використання кількох інструментів дозволяє покрити всі аспекти створення ВДЕ-комплексу – від економіки до електротехніки – і тим самим забезпечує успішну реалізацію проекту [18].

2.3 Висновки до розділу 2

Переважання ВДЕ призводить до необхідності переходу від окремих технологій до комбінованих автономних систем, які включають накопичувачі енергії та резервні генератори. Поєднання різних типів генераторів в єдиній архітектурі дозволяє підвищити надійність, гнучкість і стійкість електропостачання.

Проектування та управління системами з ВДЕ неможливе без точних математичних моделей складних фізичних і стохастичних процесів. Для цього використовуються комбіновані методи: класичні чисельні (кінцево-різницеві, кінцево-елементні) разом з імовірнісними та оптимізаційними алгоритмами – щоб враховувати мінливість погоди та ринкових умов.

Порівняльний аналіз показує:

- економічну оптимізацію краще проводити в HOMER Pro або SAM;
- високоточне моделювання сонячних станцій – в PVsyst;
- аналіз режимів енергомереж – в DIgSILENT PowerFactory або PSS/E;
- динамічне моделювання мікромереж і розробку алгоритмів управління – в Matlab/Simulink або TRNSYS.

Тому проектування та дослідження АСЕ має будуватися на комплексному підході: поєднувати різні моделі та програми, послідовно переходячи від попередніх техніко-економічних оцінок до детального інженерного та мережевого аналізу. Тільки так можна об’єктивно оцінити технічну реалізованість, економічну ефективність і мережеву сумісність проектів – що критично важливо для декарбонізації та сталого розвитку енергетики України та світу.

3. АНАЛІЗ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ АВТОНОМНОЇ СИСТЕМИ ЕНЕРГОПОСТАЧАННЯ МАТЕМАТИЧНИМИ МЕТОДАМИ

3.1 Термін «енергоефективність»

Енергоефективність АСЕ визначається їх здатністю знижувати енергетичні втрати на всіх етапах перетворення, передачі та використання електроенергії, зберігаючи при цьому необхідну якість живлення та стабільність функціонування обладнання. В рамках інженерного підходу під енергоефективністю розуміється не тільки зменшення сумарного споживання енергії, але і підвищення коефіцієнта корисної дії всіх вузлів системи, що дозволяє забезпечувати задані режими роботи при мінімальних витратах ресурсів і без шкоди для технологічної надійності та екологічних показників.

Одним з ключових факторів підвищення енергоефективності є застосування обладнання, конструктивно орієнтованого на зниження внутрішніх втрат. До таких елементів відносяться трансформатори зі зниженими втратами холостого ходу і короткого замикання, інвертори з високочастотною модуляцією, а також електродвигуни підвищеної ефективності, що відповідають міжнародним класам IE3 і IE4. Використання подібних пристроїв зменшує паразитні теплові та електричні втрати, що особливо важливо в АСЕ, де обмеженість виробленої енергії визначає жорсткі вимоги до раціональності її використання.

Іншим напрямком забезпечення енергоефективності є оптимізація режимів роботи системи. Вона включає інтелектуальне регулювання навантаження, застосування автоматизованих систем управління (рані вказані EMS, SCADA), а також впровадження алгоритмів динамічного розподілу потужності. Завдяки цим рішенням система здатна адаптуватися до змін споживання, згладжувати пікові навантаження і підтримувати стабільні параметри напруги і частоти. Подібна оптимізація знижує кількість перетворень енергії, зменшує динамічні

втрати і розширює ресурс обладнання, що в сукупності підвищує загальний енергетичний ККД установки.

Важливу роль відіграє і застосування сучасних матеріалів і технологічних рішень в елементах електричних кіл. Це проявляється у використанні провідників зі зниженим питомим опором, поліпшених магнітопроводів для котушок і трансформаторів, а також покриттів, що знижують поверхневі і коронні втрати при передачі електроенергії. За рахунок цього зменшуються втрати на нагрів. Також знижуються і магнітні втрати, пов’язані з вихровими струмами і гістерезисом. Ці заходи дозволяють підтримувати високу ефективність навіть при значних протяжностях кабельних ліній і складних конфігураціях автономних мереж.

Державні стандарти в сфері енергоефективності формують нормативну базу для розробки та впровадження подібних рішень. Стандарт ДСТУ ISO 50001 встановлює вимоги до систем енергетичного менеджменту і орієнтований на забезпечення безперервного поліпшення енергетичних показників. Він регламентує порядок моніторингу, аналізу та оптимізації енергетичних процесів, визначає принципи вибору енергоефективного обладнання, а також передбачає розробку та реалізацію програм зниження енерговитрат і підвищення ефективності використання ресурсів. Крім того, стандарт приділяє увагу екологічному аспекту, пов’язуючи підвищення енергоефективності зі зменшенням викидів парникових газів і розширенням використання відновлюваних джерел енергії.

Впровадження систем енергетичного менеджменту відповідно до вимог ДСТУ ISO 50001 сприяє зниженню експлуатаційних витрат, підвищенню технологічної надійності та екологічної стійкості підприємств, а також створенню умов для їх конкурентоспроможності в сучасних економічних умовах. Таким чином, енергоефективність АСЕ є комплексною характеристикою, що формується на основі технічних, організаційних і нормативних заходів, спрямованих на раціональне та стале використання електричної енергії.

3.2 Оптимізація методів і засобів резервування ВДЕ

Серед усіх відомих методів забезпечення надійності АСЕ на основі ВДЕ, найпростішим, економічно доступним і одночасно найбільш енергоефективним залишається класичне електрохімічне накопичення енергії в акумуляторних системах, переважно літій-іонного типу, із застосуванням інтелектуального управління процесами заряду і розряду.

Саме концепція резервування надлишкової енергії, виробленої установками на основі ВДЕ, для її подальшого керованого використання лежить в основі всіх сучасних підходів до оптимізації автономних систем. Накопичення енергії дозволяє повністю або в максимальній мірі виключити застосування резервних генераторів, згладити стохастичний характер сонячної та вітрової генерації, перенести денне виробництво на періоди пікового вечірнього та нічного споживання, а також гарантувати 100% покриття критично важливих навантажень навіть при багатоденних періодах несприятливих погодних умов.

Внаслідок цього як техніко-економічна, так і експлуатаційна оптимізація сучасних АСЕ будується навколо центрального завдання – максимального корисного використання зарезервованої енергії при мінімальних втратах і мінімальній вартості повного циклу «заряд-зберігання-розряд».

Нові математичні методи, що випливають із завдання оптимального резервування за останні 5-7 років сформувався цілий клас нових математичних підходів, безпосередньо обумовлених необхідністю оптимального управління накопиченою енергією. Стохастична спільна оптимізація розмірності системи та ємності накопичувача (реалізована в HOMER Pro, SAM, REopt) – одночасна оптимізація потужності фотоелектричних і вітрових установок спільно з ємністю акумуляторної батареї за критерієм мінімуму приведеної вартості електроенергії (LCOE) при заданому рівні надійності (наприклад, LPSP ≤ 1 %) [14, 17].

Дво- та багатоперіодна оптимізація (multi-period / receding-horizon optimization) – вирішення задачі розподілу зарезервованої енергії між поточним

і майбутніми часовими горизонтами з урахуванням прогнозу метеоумов і профілю споживання на 24-72 години вперед [14].

Оптимізація стратегій заряду/розряду з урахуванням деградації акумуляторів SOH-aware control – мінімізація глибини розряду і кількості циклів, що збільшує реальний термін служби батареї на 30-50% при незмінній номінальній ємності [14].

Алгоритми машинного навчання та навчання з підкріпленням – навчання агента в середовищі симуляції (найчастіше Matlab/Simulink або Python + OpenDSS) максимально ефективно розпоряджатися наявним запасом енергії залежно від прогнозу та поточного стану системи.

Гібридні багатоцільові методи (MOGA, NSGA-III, HBA, PSO + MILP) – одночасна мінімізація трьох цільових функцій: собівартості кВт·год (LCOE), втрат невикористаної енергії і дефіциту електропостачання [9, 14].

У період 2025-2030 років акумуляторне накопичення енергії з інтелектуальним управлінням зберігає статус найбільш економічного та ефективного способу досягнення високої енергоефективності та надійності автономних систем на основі ВДЕ. Всі сучасні та перспективні математичні методи оптимізації – від класичних генетичних алгоритмів до нейронних мереж і навчання з підкріпленням – по суті вирішують одне завдання: як найкращим чином використовувати кожну кіловат-годину енергії, зарезервовану вдень, щоб уникнути її втрат і виключити необхідність запуску дорогого резервного генератора вночі [14].

Саме здатність максимально раціонально управляти зарезервованою енергією визначає мінімальну собівартість і максимальну автономність системи. Тому акумуляторне накопичення з інтелектуальним управлінням залишається «золотим стандартом» для більшості реальних проектів автономних і мікромережевих систем електропостачання.

Резервування в автономних системах зазвичай реалізується через накопичувачі енергії, такі як літій-іонні батареї, суперконденсатори або гібридні рішення з резервними генераторами.

Основні способи резервування включають:

- Електрохімічне зберігання: Батареї (Li-ion, свинцево-кислотні) дозволяють акумулювати енергію для пікових навантажень. Оптимізація тут фокусується на балансі між ємністю, циклом життя і вартістю.
- Гібридні підходи: Комбінація ВДЕ зі сховищами та резервними джерелами (наприклад, дизель для екстрених випадків) забезпечує надійність. Інтелектуальне управління (Intelligent Power Management Control) прогнозує та коригує процеси, мінімізуючи використання палива.
- Двонаправлене зберігання: Сучасні системи з електро-тепловим зберіганням дозволяють оптимізувати як планування, так і експлуатацію, враховуючи бі-дирекційні потоки енергії.

Енергоефективність досягається за рахунок мінімізації перерозряду/перегріву акумуляторів та інтеграції з прогнозами погоди.

3.3 Аналіз математичних методів оптимізації

Математичні методи оптимізації АСЕ являють собою сукупність формальних моделей, алгоритмів і обчислювальних процедур, спрямованих на знаходження таких режимів роботи і конфігурацій елементів системи, які забезпечують мінімальні енергетичні втрати, максимальну стійкість і раціональний розподіл ресурсів. В інженерній практиці під оптимізацією розуміється процес вибору найкращого рішення в умовах безлічі технічних обмежень і зовнішніх факторів, що впливають на функціонування автономної енергосистеми. Використання математичних методів дозволяє формалізувати складні багатофакторні залежності, які в реальних експлуатаційних умовах неможливо оцінити інтуїтивно або на основі простих емпіричних правил.

Цілями застосування математичних методів в АСЕ є забезпечення мінімізації сумарного енергоспоживання, оптимізація розподілу потоків, зниження пікових навантажень, підвищення коефіцієнта використання генеруючих установок і продовження ресурсу акумуляторних систем. Найбільш

значущим напрямком є пошук таких режимів управління, при яких досягається баланс між генерацією, споживанням і накопиченням енергії. Математичне моделювання дозволяє описувати динаміку стану мережі, передбачати зміни параметрів при різних сценаріях навантаження, а також виявляти приховані залежності, які впливають на ефективність роботи системи. На основі цих моделей формуються алгоритми прогнозування, адаптивного управління і розподілу ресурсів, що забезпечують стійкість АСЕ в умовах змінного навантаження і обмеженої потужності джерел.

Істотне значення мають методи оптимізації конфігурації обладнання. Вони дозволяють визначати оптимальні типи і потужності інверторів, трансформаторів, акумуляторних батарей і ліній передачі, а також оптимальну топологію мережі з точки зору мінімальних втрат. У сучасних дослідженнях активно застосовуються методи лінійного і нелінійного програмування, стохастичні оптимізаційні алгоритми, еволюційні обчислення, а також гібридні методи, що поєднують кілька підходів для підвищення точності і швидкості рішення. Всі ці інструменти дають можливість враховувати широкий спектр критеріїв: від вартості обладнання та надійності роботи до кліматичних умов і особливостей споживчих навантажень.

Незважаючи на широкі можливості математичних методів, їх застосування супроводжується рядом обмежень, обумовлених специфікою реальних автономних систем. Одним з ключових обмежень є неповнота вихідних даних. У реальних умовах параметри навантаження, ефективність обладнання та стан акумуляторів можуть змінюватися непередбачувано, що знижує точність математичних моделей. Додаткові труднощі пов’язані з необхідністю врахування нелінійних процесів, таких як втрати в силовій електроніці, температурні залежності характеристик акумуляторів або вплив старіння компонентів. Ці фактори призводять до того, що навіть найретельніше побудована модель не може повністю відобразити реальний стан системи.

Іншим обмеженням є обчислювальна складність оптимізаційних задач. Багато математичних постанов для АСЕ відносяться до класу NP-складних задач,

що вимагає застосування евристичних або наближених методів. Такі методи, хоча і забезпечують працездатні рішення, не гарантують абсолютної оптимальності результату. Крім того, математична оптимізація не завжди може враховувати суб'єктивні інженерні переваги, регуляторні вимоги або необхідність закладати додаткові запаси надійності, які виходять за рамки суворих математичних критеріїв.

3.3.1 Режимні перемикання навантажень систем подачі електроенергії

Режимне перемикання навантаження ґрунтується на принципі узгодження споживання з поточними можливостями генерації та накопичення енергії. В автономних умовах, де джерела часто характеризуються змінною потужністю - наприклад, сонячні панелі або вітроустановки – такі методи дозволяють підтримувати баланс між енергією, що виробляється і споживається, без необхідності збільшення резервних потужностей. Системи автоматизації аналізують поточний стан мережі, прогнозують очікуваний профіль навантаження і, виходячи з цього, приймають рішення про підключення, відключення чи перестановку споживачів між лініями та інверторними каналами. Це сприяє зниженню ризику навантаження обладнання, зменшує теплові та електричні втрати та формує більш рівномірний режим роботи елементів АСЕ.

Важливим аспектом є використання пріоритетного управління навантаженнями, коли споживачі класифікуються відповідно до їх критичності та можливості тимчасового обмеження. У разі автономного енергопостачання такий підхід дозволяє тимчасово знижувати навантаження систему за рахунок відключення другорядних споживачів, зберігаючи харчування найбільш значних вузлів. При цьому перемикання режимів може відбуватися як за певними алгоритмами, так і в автоматичному режимі на основі даних моніторингу. Завдяки цьому забезпечується висока адаптивність системи до зовнішніх змін,

включаючи коливання вироблення енергії, зміну погодних умов та динаміку споживання.

Методи режимного перемикання навантажень впливають і довговічність устаткування. Рівномірний розподіл навантаження між лініями та перетворювальними каналами знижує ступінь зносу окремих елементів та мінімізує температурні навантаження, які є одним із ключових факторів деградації інверторів та акумуляторів. Особливо важливою є функція обмеження пікових струмів при запуску потужних споживачів: режимне керування дозволяє здійснювати плавне підключення або розподіл навантажень за часом, що зменшує ударні струми та продовжує термін служби силової електроніки.

Важливим аспектом є використання пріоритетного управління навантаженнями, коли споживачі класифікуються відповідно до їх критичності та можливості тимчасового обмеження. У разі автономного енергопостачання такий підхід дозволяє тимчасово знижувати навантаження систему за рахунок відключення другорядних споживачів, зберігаючи харчування найбільш значних вузлів. При цьому перемикання режимів може відбуватися як за певними алгоритмами, так і в автоматичному режимі на основі даних моніторингу. Завдяки цьому забезпечується висока адаптивність системи до зовнішніх змін, включаючи коливання вироблення енергії, зміну погодних умов та динаміку споживання.

Для визначення оптимального розміру одиниць запропоновано три різні методи оптимізації: метод найменших квадратів з обмеженнями рівності, метод найменших квадратів з обмеженнями нерівності та змішане цілочисельне лінійне програмування.

3.3.1.а Метод найменших квадратів з обмеженнями рівності ECLS

Метод найменших квадратів з обмеженнями рівності ECLS – це модифікація традиційного методу найменших квадратів, у якій рішення шукають

як шляхом мінімізації суми квадратів помилок, а й за обов’язковому виконанні заданих лінійних рівнянь.

Суть методу полягає в тому, що оптимальне рішення підбирається у допустимому підпросторі, що визначається цими рівняннями. На відміну від звичайного методу найменших квадратів, де рішення вільно «рухається» у напрямку мінімізації помилки, ECLS жорстко прив’язане до геометричної поверхні обмежень. Для знаходження результату використовуються Лагранжові множники або еквівалентні блокові матриці, що формують систему, в якій одночасно задовольняються умови мінімуму, і умови рівності.

Метод застосовується, коли модель апріорі має суворо задовольняти фізичним, геометричним чи балансовим законам – наприклад, збереження енергії, фіксування вузлових потенціалів чи виконання калібрувальних співвідношень. ECLS забезпечує більш коректні рішення в таких завданнях, за винятком неприпустимих варіантів, але при цьому обмежує гнучкість моделі і може ускладнювати обчислення при великій кількості обмежень.

Мета такого методу полягає в максимізації використання сонячної енергії, враховуючи прогнозоване виробництво енергії з ВДЕ. Тут використання сонячної енергії визначається як відсоток енергії, захопленої блоками, від загальної виробленої сонячної енергії. Це схоже на такі терміни, як коефіцієнт використання сонячної енергії, або втрата живлення [19], які зазвичай використовуються в науковій літературі. Передбачається, що навантаження перемикаються між двійковими станами «увімкнено» та «вимкнено» (ON/OFF), де як час перемикання, так і розмір статичного споживання потужності (розмір статичного навантаження) визначають здатність відстежувати доступну сонячну енергію.

Для оптимізації моделей вже існують розробки як аналітичних рішень, так і обчислювальних підходів на основі методу найменших квадратів з обмеженнями рівності ECLS, що дозволяє провести оптимізацію навантаження [9, 10, 14, 21].

Процес можна описати блок-схемою, як показано на рисунку 2, починаючи з даних про річну сонячну радіацію протягом щонайменше одного року, щоб врахувати сезонні зміни. Потім використовується модель потужності для обчислення сонячної енергії, а потім сортуються річні дані про сонячну енергію, після чого вводиться кількість бажаних одиниць, після чого обчислюється оптимальний розмір одиниці, а потім складається щоденний графік роботи одиниць.

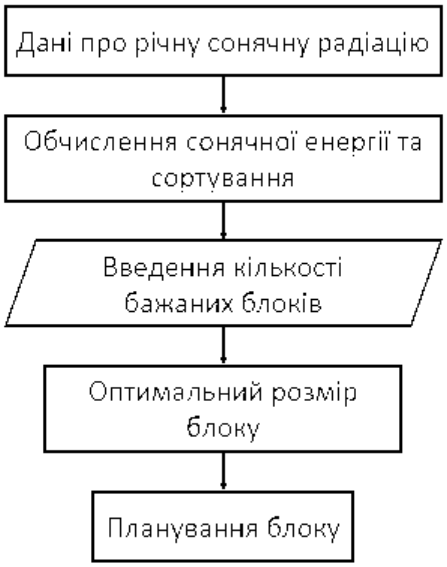


Рисунок 3.1 – Блок-схема запропонованого процесу оптимізації методом ECLS

Теоретична основа закладається з побудови класичної SLM, що мінімізує суму квадратів похибок у вигляді [19]:

$$\min_{x} \left|\left|Ax - b\right|\right|^2 \tag{3.1}$$

де A – матриця даних (наприклад, профілі потужності);

b – цільовий вектор (наприклад, необхідне навантаження);

x – вектор параметрів (розміри компонентів).

$$\hat{x} = (A^T A)^{-1} A^T b \tag{3.2}$$

Для ACE такий метод застосовується для апроксимації профілів генерації (сонячної/вітрової) за даними, що спостерігалися.

Спочатку визначаються значення про постачання (сонячної) енергії $S(t)$, що відбирається через регулярні інтервали часу:

$$t = t_k = k\Delta T \tag{3.3}$$

де $\frac{1}{\Delta T}$ – фіксована частота дискретизації;

k – індекс вибірки.

Таким чином отримають набір даних T точок про виробництво сонячної енергії $S(tk), k = 1, \dots, T$. Як правило, $S(t_k)$ близька до добової періодичної функції. При $S(tk) \geq 0$ протягом добового інтервалу часу $t_k \in [t_b, t_e]$, де b – початок, а e – кінець дня, з максимальним значенням:

$$S_{max} = \max_k S(t_k) \tag{3.4}$$

Що зазвичай дорівнює номінальній потужності змінного струму сонячної енергетичної системи. Дані $S(t_k)$ та S_{max} можуть бути отримані з історичних вимірювань сонячної енергії або з вимірювань сонячного випромінювання разом з моделлю ефективності перетворення сонячної енергії.

Статичну невідповідність потужності $E(t_k)$ у певний момент часу t_k можна записати як скалярний добуток [9, 21]:

$$E(t_k) = S(t_k) - u_k x \tag{3.5}$$

В оптимізації статичної реакції на навантаження розглядають певну кількість n навантажень, де кожне навантаження $i = 1, \dots, n$ характеризується лише значенням статичної потужності x^i, яке можна або ввімкнути, або вимкнути. Враховуючи кількість навантажень n, метою оптимізації статичної реакції на навантаження є знаходження оптимального розподілу значень статичного навантаження x^i, $i = 1, 2, \dots, n$, щоб вимірювана в часі подача сонячної енергії $S(tk)$ могла бути апроксимована якомога точніше для максимізації отриманої енергії.

Мінімізують суму квадратів помилок потужності за таким виразом:

$$E(t_k) = S(t_k) - \sum_{i=1}^{n} u_k^i x^i \quad (3.6)$$

де u_k^i – це бінарний вектор стану навантажень.

Значення u_k^i взагалі описує кількість n двійкових чисел, що відображають стан вмикання/вимикання окремих навантажень $i = 1, \ldots, n$ з їхньою (яку потрібно визначити) статичною величиною навантаження x^i.

Обмеження рівнянь отримують такий вигляд:

$$\sum x_i = CS_{max} > x_i \geq x_{i-1} \quad (3.7)$$

Далі визначається векторна матриця станів за величиною навантаження:

$$u_k = [u_k^1 \quad u_k^2 \quad \ldots \quad u_k^n],\ u_k^i \in [0,1] \quad (3.8)$$

$$x = [x^1 \quad x^2 \quad \ldots \quad x^n],\ x^i > 0 \quad (3.9)$$

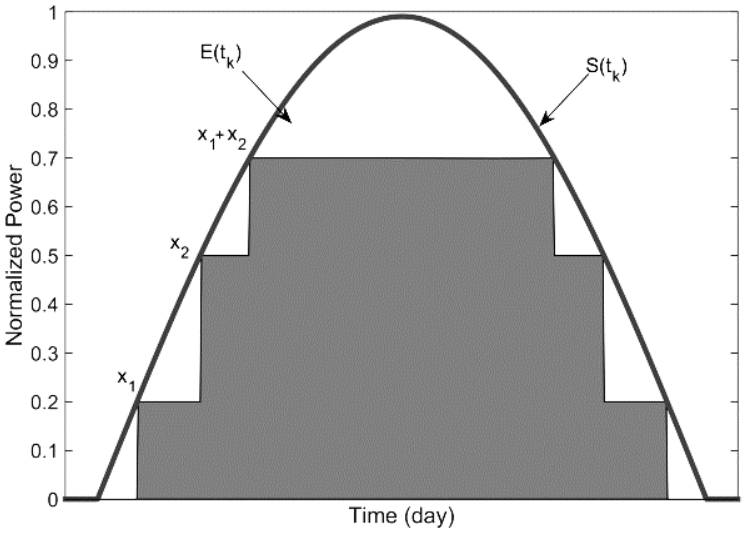


Рисунок 3.2 – Ілюстрація задачі для одного ясного та симетричного дня. Навантаження x^i плануються щогодини відповідно до збільшення або зменшення виробництва сонячної енергії $S(t_k)$ [19]

Для обліку рівнів, таких як баланс енергії $P_{gen} = P_{load}$, додається обмеження $C_x = d$. Умови ККТ призводять до такої системи [20]:

$$\begin{bmatrix} A^T A & C^T \\ C & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{x} \\ \lambda \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A^T b \\ d \end{bmatrix} \tag{3.10}$$

де λ – множники Лагранжа. Це забезпечує унікальне рішення за лінійної незалежності рядків C.

Для обчислення більш стабільними значеннями використовують алгоритм рішення QR-факторизації:

$$\begin{bmatrix} A \\ C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Q_1 \\ Q_2 \end{bmatrix} R \tag{3.11}$$

В автономних системах ECLS використовується для оптимізації навантажень, що перемикаються в сонячних установках, мінімізуючи невідповідність потужності [18, 19].

3.3.2.б Метод найменших квадратів з обмеженнями нерівності ICLS

Для нерівностей $C_x \leq d$, таких як межі потужності ($P \leq P_{max}$), застосовуються штраф-методи або методу для прогнозованого градієнту. штраф-формулювання має такий математичний вигляд [20, 21]:

$$\min_x \left|\left|Ax - b\right|\right|^2 + \mu \sum \left(\max\left(0, g_i(x)\right)\right)^2 \tag{3.12}$$

де $g_i(x) \leq 0$ – наявні нерівності;

μ – штрафний інтеративний параметр;

Для цього необхідно виявити інтерацію таким чином:

$$x^{k+1} = P_s\left(x^k - t\nabla f(x^k)\right) \tag{3.13}$$

де P_s – проекція на допустиму множину.

Метод також можна використати для прогнозованого градієнта [20]:

$$x_{fg} = P_S(x - t\nabla f(x)) \tag{3.14}$$

де $\nabla f(x) = A^T(Ax - b)$ – матричний крок.

3.3.2.в Змішане цілочисельне лінійне програмування MILP

Оскільки задача оптимізації є білінійною, що включає поєднання двійкових та дійсних чисел, можна застосувати обмежений діапазон розв'язувачів оптимізації, і жоден з них не може гарантувати глобальну оптимальність. Щоб гарантувати оптимальність, ми використовуємо метод релаксації Big-M для перетворення задачі оптимізації на задачу лінійного програмування зі змішаним цілим числом, тобто опуклість MILP задовольняє умову нульової двоїстості [20].

Крім того, MILP має можливість визначати точний графік перемикання одиниць навантаження, чого бракує іншим підходам, що обговорюються в цій статті. Фактично, розв'язання задачі оптимізації за допомогою MILP еквівалентне одночасному розв'язанню задач планування та складання розкладів. Існує багато зрілих розв'язувачів MILP, які здатні розв'язувати масштабні задачі MILP з мільйонами змінних протягом достатніх для розрахунку термінів [20]. Правильний вибір змінних оптимізації та використання диз'юнктивних методів, обговорених у [20], дозволяють переформулювати початкову задачу як задачу MILP. Позначаючи двійкову змінну $u_i(t_k)$ як стан увімкнення/вимкнення блоку і на кроці часу t_k, задача оптимізації представлена нижче:

$$\min_{u_i x_i} \sum_{t_k=1}^{T} [S(t_k) - \sum_{i=1}^{n} y_i(t_k)] \tag{3.15}$$

3.3.2.г Гібридні методи на основі LSM

p-ARGONAUT (Grey-Box MOO) – це спеціальний метод для багатоцільової оптимізації із сурогатними моделями, ідентифікованими LSM (мінімізація CVMSE). ε-констрейнт конвертує MOO в одиночній комірці [22]:

$$\min f_1(x) \quad s.t. \quad f_2(x) \leq \varepsilon \tag{3.16}$$

Послідовне програмування найменших квадратів (Sequential Least Squares Programming, SLSP) – це градієнтний метод, що вирішує послідовні квадратичні окремі задачі на основі LSM для апроксимації цілі та обмежень. У ACE з РГ мінімізує багаторічні витрати [23]:

$$\min C = C_{cop} + C_{o\&m} + C_f \tag{3.17}$$

$$E_d + E_s + E_w = E, A_{s,max} \tag{3.18}$$

3.3.3 Застосування режимних перемикань навантажень

Порівняння використання сонячної енергії між трьома підходами до оптимізації показує близькі результати для кожного числа n одиниць. Наведено підсумок оптимального розміру одиниці, досягнутого кожним методом, а також використання сонячної енергії [19]. ECLS було обрано як еталонний випадок і йому було присвоєно використання сонячної енергії. Теоретично підхід до оптимізації ICLS повинен призвести до найбільшого використання сонячної енергії, оскільки він використовує повний набір даних і найменшу кількість змінних оптимізації. ICLS дійсно дав найкращі результати, але поліпшення в порівнянні з ECLS становили лише від 3,9% до 0,1% зменшення втрат при збільшенні n.

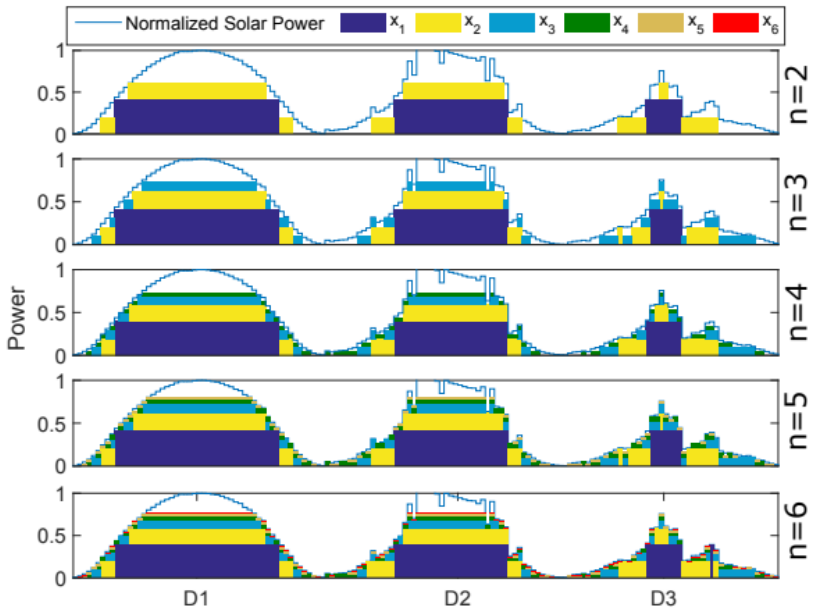


Рисунок 3.3 – Результати планування для чотирьох різних днів: D1 – ясний, D2 – переважно ясний з розсіяними хмарами, D3 – хмарно. Представлено розміри одиниць методу ICLS [19].

Однак результати MILP були дещо меншими, ніж ICLS. З рисунка 3.3 також видно, що зі збільшенням n різниця між підходами зменшується.

Слід пам’ятати, що ці результати нормалізовані як для сонячної енергії, так і для розміру блоку. Основна різниця між двома об’єктами полягає в тому, що в випадку Тувала перевага надається більшим блокам із середнім збільшенням розміру на 25%. Для $n = 2$ використання сонячної енергії для Тувала було більшим порівняно з Сан-Дієго, головним чином через більшу кількість ясних днів протягом року. Зі збільшенням n використання сонячної енергії обох об’єктів наближається, поки не збігається для $N = 6$.

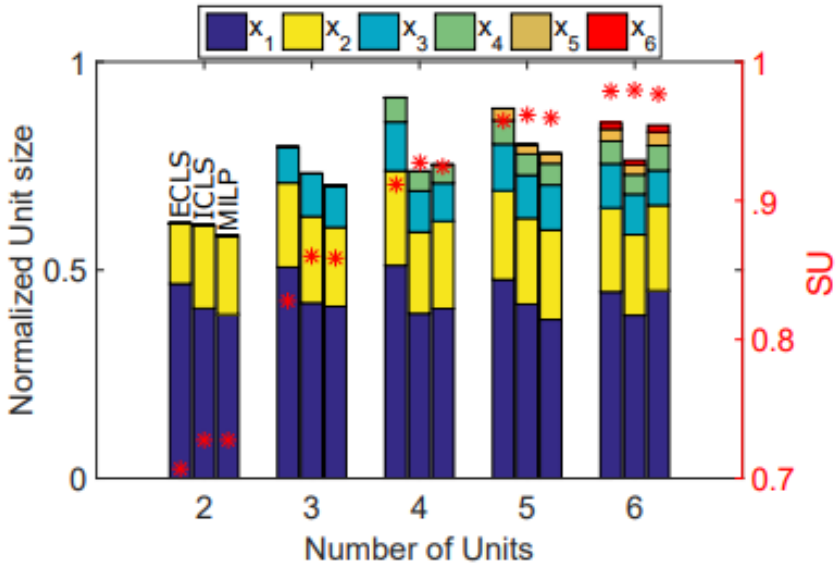


Рисунок 3.4 – Узагальнені результати ефективності методів [19]

Кожен метод має свої переваги та недоліки при вирішенні проблеми розміру блоків, як підсумовано в таблиці 3.1. З точки зору глобальної оптимальності, аналітичний підхід довів свою здатність досягати глобального оптимуму, але його не можна узагальнити для всіх фотомодулей. З іншого боку, інші підходи виявилися надійними і придатними для реальних задач розміру. Підхід MILP гарантує глобальну оптимальність, але його обчислювальні витрати зростають експоненціально з кількістю змінних рішень і обмежень. ECLS також вимагав зменшення вибірки, що пояснює зменшення різниці в використанні сонячної енергії між різними методами при збільшенні n, де зменшення вибірки стає більш точним. ICLS не гарантує збіжності до глобального оптимуму, а може застрягнути в локальному мінімумі. Таким чином, остаточне рішення сильно залежить від початкових умов. Цього можна уникнути, злегка змінюючи початкове або кінцеве рішення і перезапускаючи оптимізацію, тим самим досліджуючи простір рішень.

Таблиця 3.1 – Переваги та недоліки методів [19]

	ICLS	ECLS	MILP	Гібридні, аналітичні LSM
Переваги	– Швидкий за розрахунками, – Враховує всі відсортовані дані, Нерівновіддалений	– Швидкий за розрахунками, – Знаходить найкращій мінімум фіксованого значення	– Надає найкращу оптимальність, – Враховує обмежені дані, – Додавання обмежень	– Швидкі за розрахунками, – Не потребують математичних наближень, – Гарантують глобальні оптимуми
Недоліки	– Не гарантується глобальна – Оптимальність, – Чутливість до початкових умов	– Необхідне зменшення дискретизації, – Еквідістантний (математично немобільний), – Необхідний лінійний пошук для обмеження	– Вимагає значних обчислювальних ресурсів, – Вимагає зниження роздільної здатності	– Тільки для симетричних, – тобто ясних днів, – Не можна використовувати для планування алгоритмів

Аналітичний підхід не можна узагальнити для всіх сонячних денних моделей; він вимагає функціональної форми для сонячних даних, а також необхідно знати обернену функцію, що обмежує застосування цього підходу до щорічних даних. З цієї причини аналітичний метод не можна використовувати для реальних проблем розміру. Техніка MILP є найбільш гнучким підходом, особливо з огляду на можливість додавання додаткових обмежень до проблеми, таких як батарея або мінімальний час роботи та простою. Він також може вирішувати щоденні моделі, які підходять для перегляду графіків з глобальними вимогами до оптимальності в разі збіжності, проте кількість змінних відіграє велику роль у збіжності та визначенні оптимальності. Основними перешкодами для MILP є висока обчислювальна вартість через велику кількість змінних, а також апроксимація або релаксація, що застосовуються до проблеми. ECLS та

ICLS є масштабованими для вирішення задач за кілька років з швидким часом обчислення. Основними недоліками цих підходів є те, що вони не враховують щоденний сонячний профіль, а також мають обмежену здатність додавати обмеження або покращувати випадок, як у випадку додавання акумуляторів або мінімального часу роботи та простою.

Алгоритм вирішує завдання оптимального розміру блоку протягом одного року, який містить різні щоденні моделі на основі переважаючих погодних умов. Для ясного дня очевидно, що велика частина піку дня втрачається, але втрата енергії зменшується із збільшенням кількості блоків n. З іншого боку, у найбільш хмарний день D3 втрати були зменшені. Це є відображенням вхідних даних, де ясні періоди опівдні, які дають нормалізовану вихідну потужність, близьку до 1, є менш поширеними, ніж похмурі дні та періоди вранці та ввечері. Отже, розміри блоків вибираються таким чином, щоб більш точно відстежувати нижчі вихідні потужності, а ясні періоди опівдні скорочуються. Якщо алгоритм був призначений для вирішення оптимізації лише для одного з денних патернів або для іншого місця, результати були б іншими.

Фотоелектрична енергія є бажаним джерелом енергії для багатьох автономних застосувань. Мінливість сонячної радіації є однією з головних проблем використання фотоелектричної енергії. Були розроблені та застосовані найсучасніші методи оптимізації для оптимізації використання сонячної енергії шляхом визначення розміру певної кількості навантажувальних одиниць на основі даних, зібраних протягом одного року в Сан-Дієго та Саудівській Аравії. Алгоритм вмикає та вимикає одиниці, щоб «відстежувати навантаження» доступної сонячної енергії протягом дня для максимального використання сонячної енергії. Основним результатом роботи алгоритмів є визначення оптимального розміру для заданої кількості одиниць, але планування роботи одиниць є побічним продуктом аналізу.

Отримані результати будуть відрізнятися залежно від місцезнаходження і можуть навіть змінюватися з року в рік через просторово-часові закономірності сонячних ресурсів і хмарного покриття, що видно з різних результатів для Сан-

Дієго, США, і Тувала, КСА. Методологія дозволяє отримати обчислювально ефективні рішення навіть при наявності даних про сонячні ресурси за кілька років і дає оптимальний розмір для заданих даних.

Для практичного застосування також необхідно враховувати економічні аспекти, оскільки менші одиниці зазвичай коштують дорожче за одиницю кВт, а отже, оптимізація на основі вартості дасть більші одиниці і віддасть перевагу у меншій їх кількості. В рамках цього можна призначити функцію вартості кількості одиниць і використанню сонячної енергії, щоб отримати рішення для практичного застосування.

Ефективність трьох методів була порівняна за допомогою двох прикладів. Результати для Сан-Дієго показують, що використання сонячної енергії (тобто відсоток енергії, що уловлюється блоками від доступної енергії) відрізнявся між алгоритмами менше ніж на 5%. Було показано, що використання збільшилося з 73% для двох блоків до 98% для шести блоків у випадку Сан-Дієго. Як і очікувалося, оптимізація ICLS дає найбільше використання [19].

3.3.4 Методика розподілу генераційних систем та акумуляторів АРО на основі FO-PID

Традиційні PID-контролери (Proportional-Integral-Derivative) обмежені в обробці нелінійних динамік, в той час як дробові PID (FO-PID) з додатковими параметрами λ і μ забезпечують більшу гнучкість [19].

Оптимізатор штучних найпростіших АРО – це біоінспірований метаевристичний алгоритм, що моделює поведінку найпростіших організмів (протозоа) у пошуках їжі, включаючи фази фореджингу, спокою та розмноження. Інтеграція АРО з FO-PID дозволяє динамічно налаштовувати параметри контролера для оптимального розподілу потужності, мінімізуючи критерії, такі як LPSP і NPC. Дана методика особливо актуальна для північних територій і промислових об’єктів, де логістика палива ускладнена [22].

FO-PID розширює класичний PID за рахунок дробових порядків інтегрування λ і диференціювання μ, де $0 < \lambda, \mu < 2$.

Трансферна функція контролера:

$$C(S) = K_p + \frac{K_i}{S^{\lambda}} \tag{3.19}$$

де K_p, K_i, K_d – коефіцієнти пропорційної, інтегральної та диференціальної частин відповідно. Це дозволяє краще справлятися з нелінійностями та затримками в енергосистемах, такими як флуктуації потужності ФЕ [22].

У гібридних системах FO-PID застосовується для регулювання частоти навантаження або активної потужності інвертора, забезпечуючи стабільність під збуреннями навантаження [22].

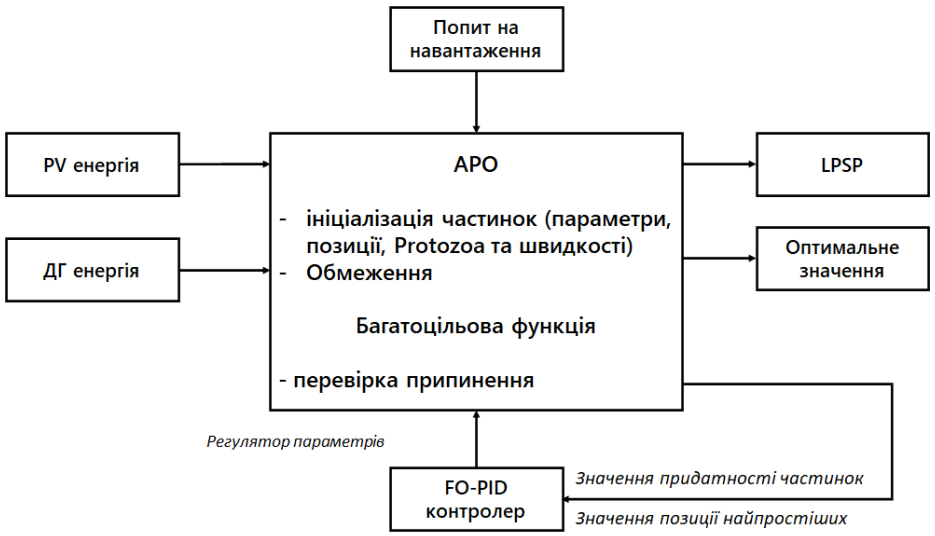


Рисунок 3.5 – Структура оптимізації для APO FO-PID

Алгоритм APO імітує природні моделі поведінки для вирішення оптимізаційних задач, як правило, у складних багатовимірних просторах пошуку. Рух найпростіших можна математично змоделювати, враховуючи баланс між дослідженням і використанням, зазвичай за допомогою вектора швидкості, який визначає напрямок і величину руху. Позицію найпростіших (тобто потенційного рішення) у момент часу $(t + 1)$ можна оновити за допомогою такого рівняння:

$$x_i(t + 1) = x_i(t) + \delta \tag{3.20}$$

де δ – вектор швидкості;

$x_i(t)$ позначає положення і-го найпростішого в момент часу t, а вектор швидкості визначає, як змінюється положення на основі стимулів навколишнього середовища (градієнти поживних речовин або присутність хижаків).

Вектор швидкості можна виразити як [22]:

$$V_i(t + 1) = wV_i(t) + c_1r_1(P_i - x_i(t)) + c_2r_2(G_i - x_i) \tag{3.21}$$

$$x_i(t + 1) = x_i(t) + V_i(t + 1) \tag{3.22}$$

де V_i – швидкість найпростіших і в момент часу t;

x_i – положення і-тої найпростішого в момент часу t;

w – інерційна вага, що врівноважує дослідження та експлуатацію

c_1, c_2 – когнітивні та соціальні коефіцієнти, що визначають вплив особистої найкращої позиції;

r_1, r_2 – випадкові числа, що рівномірно розподілені в діапазоні $\{0, \ldots, 1\}$, що додають стохастичності руху;

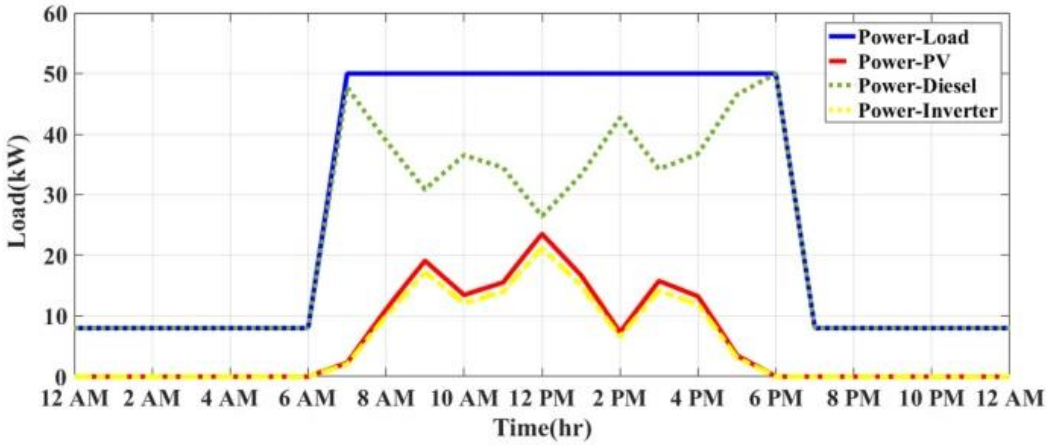


Рисунок 3.6 – Значення вихідної потужності при моделюванні системи з APO-FO-PID [22]

У похмуру погоду баланс потужності для цієї модифікованої стратегії дає результати, еквівалентні результатам стратегії управління ввімкненням/вимкненням інвертора. РГ забезпечує резервне живлення лише у разі недостатньої потужності фотомодулей, що призводить до ефективного використання палива та максимальної залежності від відновлюваної енергії. Стратегія ON/OFF вмикає або вимикає інвертор на основі заздалегідь встановлених умов (таких як порогові значення генерації PV). Цей спрощений підхід може призвести до неефективності, оскільки інвертор може не використовувати повністю доступну енергію PV, марнуючи сонячну енергію, якщо він вимкнений, і змушуючи РГ працювати довше, ніж це необхідно.

3.3.5 Впровадження методу APO на основі FO-PID

Масштабованість APO є критичним фактором в управлінні більшими або більш складними гібридними системами, особливо тими, що інтегрують системи зберігання енергії, різноманітні відновлювані джерела та конфігурації з декількома мікромережами. Адаптивність APO дозволяє їй в режимі реального часу реагувати на коливання у виробництві відновлюваної енергії, такої як сонячна та вітрова, шляхом динамічної оптимізації розподілу енергії. Для гібридних систем із накопичувачами енергії APO може оптимізувати цикли заряджання-розряджання для підвищення ефективності, мінімізації втрат енергії та підтримки стабільності системи. Такі фактори, як стан заряду, ефективність акумулятора та зношування з часом, можна адаптивно регулювати, подібно до того, як APO зараз вирішує проблему коливань сонячної енергії. Така інтеграція ще більше покращує оптимізацію використання енергії та загальну надійність системи.

Масштабування APO для систем ACE відкриває можливості для оптимізації обміну енергією між взаємопов’язаними мікромережами. Його адаптивні можливості локального пошуку та реагування в режимі реального часу можуть збалансувати потоки енергії між декількома мережами, забезпечуючи ефективну рівновагу між попитом і пропозицією в усій мережі. Модульна конструкція та низька обчислювальна вартість APO роблять його придатним для великих систем, оскільки він не залежить від централізованого управління. Натомість він функціонує незалежно на рівні кожної мікромережі, сприяючи гнучкості та стійкості в ширшу систему. Однак із зростанням складності системи проблема оптимізації стає більш складною, а накладні витрати на комунікацію між мережами можуть збільшитися, що потенційно може вплинути на продуктивність у реальному часі.

Хоча APO є ефективним для систем середнього масштабу, гібридні моделі штучного інтелекту, що поєднують такі методи, як «генетичні алгоритми» або нейронні мережі, можуть перевершувати його за швидкістю збіжності для

великомасштабних установок, але такі моделі часто жертвують об’ємом обробки даних. Щоб підвищити масштабованість АРО, майбутні зусилля повинні бути зосереджені на техніках розподіленої оптимізації, вдосконаленому прогнозуванні для управління ресурсами та всебічному тестуванні системи в різних умовах. Інтеграція паралельних обчислень або гібридних моделей може додатково вирішити проблеми високорозмірної оптимізації, що включають кілька цілей, таких як зниження витрат, ефективність зберігання та надійність. Ці вдосконалення дозволять АРО ефективно управляти складними, великомасштабними гібридними енергетичними системами, зберігаючи при цьому свої сильні сторони в адаптивності та простоті.

У віддалених регіонах (наприклад, північні широти) методика знижує залежність від дизеля. В автономних системах з великими площами покриття фотомодулями, АРО налаштовує FO-PID для споживача під кроковими збуреннями [22].

Стратегія активного регулювання потужності інвертора з використанням АРО має значні переваги над базовою стратегією управління ON/OFF. Вона максимізує використання відновлюваної енергії з фотоелектричної системи, забезпечуючи ефективне використання споживання енергії під час роботи РГ тільки в разі необхідності. Динамічне управління інвертором забезпечує безперервний потік енергії без втрат або обмеження сонячної енергії, а оптимізація АРО мінімізує споживання палива, знижуючи витрати та вплив на навколишнє середовище. На відміну від цього, стратегія увімкнення/вимкнення може призвести до неефективного використання енергії, що спричинить збільшення споживання дизельного палива та менш ефективне використання відновлюваної енергії (рис. 3.7).

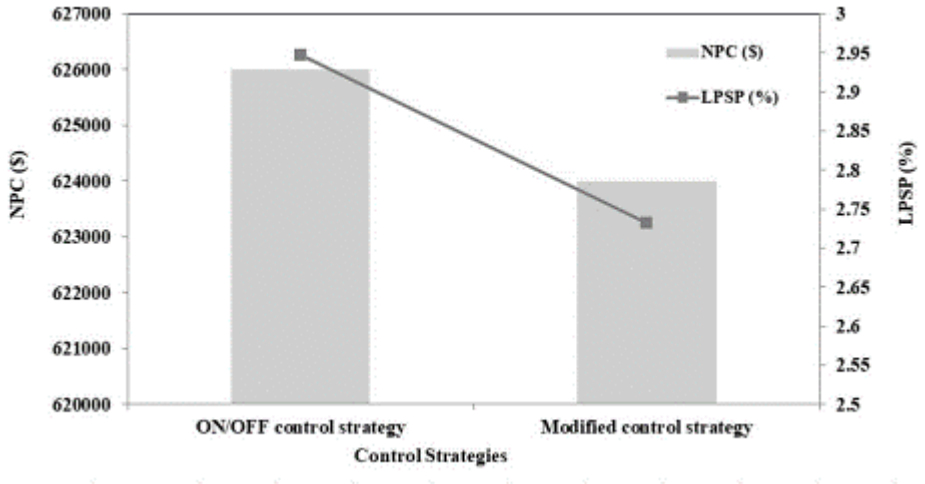


Рисунок 3.7 – Порівняння LPSP та NPC двох стратегій керування. Модифікована стратегія керування демонструє нижчі значення LPSP та NPC, ніж стратегія керування ON/OFF [22]

На рисунку 3.7 порівняно класичне та модифіковане управління енергією відповідно до SEF. Порівняння показує значні відмінності в продуктивності.

SEF для стратегії управління увімкненням/вимкненням є значно нижчим, приблизно на 12%, що вказує на нижче використання сонячної енергії. З іншого боку, MEMS досягає значно вищого SEF, приблизно 35% у сонячний день, демонструючи суттєве поліпшення ефективності використання сонячної енергії. Це порівняння підкреслює ефективність використання передових методів оптимізації, таких як FO-PID та APO, у стратегіях управління енергією. MEMS, що інтегрує FO-PID та APO, демонструє чудові результати в оптимізації SEF. Використання цих передових алгоритмів оптимізації дозволяє системі ефективно максимізувати сонячні енергетичні ресурси, що призводить до підвищення продуктивності та загальної ефективності енергетичної системи [21, 22].

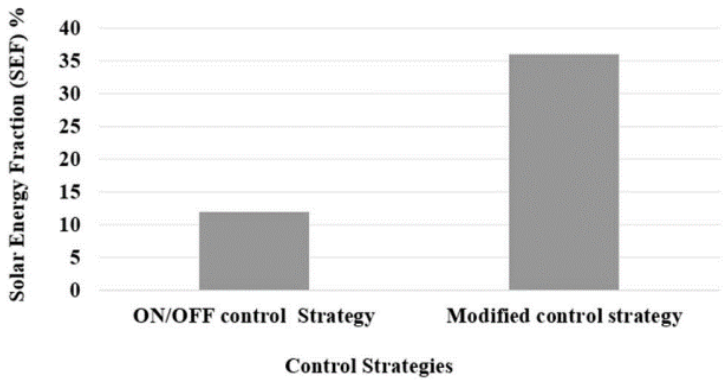


Рисунок 3.8 – Порівняння стратегій управління відповідно до SEF у сонячний день

3.3.6 Інтегральні зміни піків навантаження

Пікові навантаження виникають через невідповідність між генерацією і споживанням всередині ACE, що призводить до перевантажень і зниженню енергоефективності. Згладжування піків включає стратегії, такі як перенесення навантаження, обрізання піків і заповнення западин, для вирівнювання профілю навантаження. В автономних системах це досягається через інтеграцію BESS-PV, що мінімізує NPC і енергетичні втрати.

Інтегральні методи передбачають використання інтегральних критеріїв (наприклад, мінімізація інтеграла відхилень) або комплексних моделей, що враховують часові залежності. Аналогічні принципи побудовані на бі-рівневій оптимізації (верхній рівень – планування, нижній – диспетчеризація) і DSM для динамічного балансу.

Алгоритм згладжування пікових навантажень для ACE використовує подвійний цикл ($Loop(A)$ для $PV > 0$, $Loop(B)$ для $PV = 0$) для пріоритетного використання PV і BESS. Для моделювання використовують такий алгоритм побудови [22], де електроенергія, що генерується фотоелектричними панелями, $PPV(t)$, визначається за наведеним нижче рівнянням:

$$P_{pv}(t) = \eta_{pv} \cdot A_{pv} \cdot N_{rr}(t) \tag{3.23}$$

де η_{pv} – ККД фотопанелей, %;

A_{pv} – площа робочої зони фотопанелей, м^2;

$N_{rr}(t)$ – сонячна інсоняція за часом, Вт/м.

Далі розраховується пікове зниження, що досягається шляхом встановлення максимального обмеження P_S, вище якого вихідне навантаження обмежується:

$$P_{lc}(t) = \min(P_l(t), P_s) \tag{3.24}$$

де $P_l(t)$ – початкове навантаження в момент часу;

P_s – обране граничне значення.

Перенесення навантаження полягає у перенесенні надлишкового навантаження з пікових періодів на періоди, коли фотоелектрична генерація є найвищою. Якщо в певний момент часу t навантаження $P_l(t)$ перевищує обмеження, надлишок $P_e(t)$ визначається, що описано рівнянням:

$$P_e(t) = P_l(t) - P_s \tag{3.25}$$

Цей надлишок розподіляється на години найбільш значущої генерації фотоелектричної енергії (визначеної як більше 50% від максимальної генерації фотоелектричної енергії):

$$P_{ls}(h) = P_{ls0}(h) + \frac{P_e(t)}{N_{pv}} \tag{3.26}$$

де h – позначений час, обраний для перерозподілу;

N_{pv} – це загальна кількість годин, обраних для перерозподілу.

Підхід заповнення долини передбачає перерозподіл невикористаних потужностей у періоди низького попиту (поза піковими годинами) для покриття долин на кривій навантаження. Якщо навантаження $P_l(t)$ менше за заздалегідь визначений рівень у певний момент часу t, дефіцит навантаження $P_d(t)$ обчислюється за такою формулою [14, 19, 22]:

$$P_d(t) = P_s - P_l(t) \tag{3.27}$$

Для вирівнювання попиту цей дефіцит потім розподілявся на періоди найнижчої фотоелектричної виробництва (визначеного як менше 50% від пікової фотоелектричної потужності):

$$P_{lf}(h) = P_{lf0}(h) + \frac{P_d(t)}{N_{\min pv}} \tag{3.28}$$

3.3.7 Впровадження методу інтегральних показників

У цьому дослідженні розглядається управління енергією в ACE, що працює на сонячній енергії, з використанням методу управління попитом (DSM). Підхід DSM був застосований до 24-годинної сонячної мікромережі на острові Джербі, Туніс [22, 23]. Результати показують, що після впровадження стратегій DSM профіль навантаження більш точно узгоджувався з виробництвом сонячної енергії, оскільки значна частина попиту на енергію була перенесена на періоди з більш високою сонячною потужністю. Цей підхід забезпечує основу для досягнення більш стійких ACE шляхом оптимізації використання відновлюваних джерел енергії. Крім того, зменшення споживання енергії в ACE підвищує стабільність системи та забезпечує економію коштів. Завдяки поліпшенню балансу між навантаженням і виробництвом, цей метод також зменшує потребу в значних потужностях для зберігання, особливо в періоди низької доступності сонячної енергії.

Ця віддалена система призначена для постачання електроенергії громадам острова, сприяючи енергетичній незалежності та стійкості регіону. Аналіз проводився протягом тижня, протягом якого вимірювали інтенсивність сонячного випромінювання, щоб оцінити профіль навантаження та характеристики інтенсивності випромінювання для оцінки виробництва сонячної енергії системою. Порівняння цих результатів з аналогічними дослідженнями ACE показує постійні тенденції у виробництві електроенергії та структурі споживання, особливо в умовах віддалених островів. Дослідження, проведені в інших острівних громадах, показують подібну мінливість сонячної

інтенсивності випромінювання та профілів навантаження. Однак наші висновки свідчать про те, що ACE в Джербі [22, 23] демонструє вищу ефективність у перетворенні сонячної енергії, ймовірно, завдяки оптимізованій конструкції фотоелектричної системи та сприятливим зовнішнім умовам. Це має важливі наслідки для проектування та експлуатації ACE, підкреслюючи необхідність вдосконалення стратегії контролю енергії. У порівнянні з попередніми дослідженнями, це дослідження підкреслює потенціал для вдосконалення технологій перенесення навантаження та оптимізації систем зберігання, що може ще більше зменшити залежність від резервних генераторів та покращити загальну енергоефективність ACE.

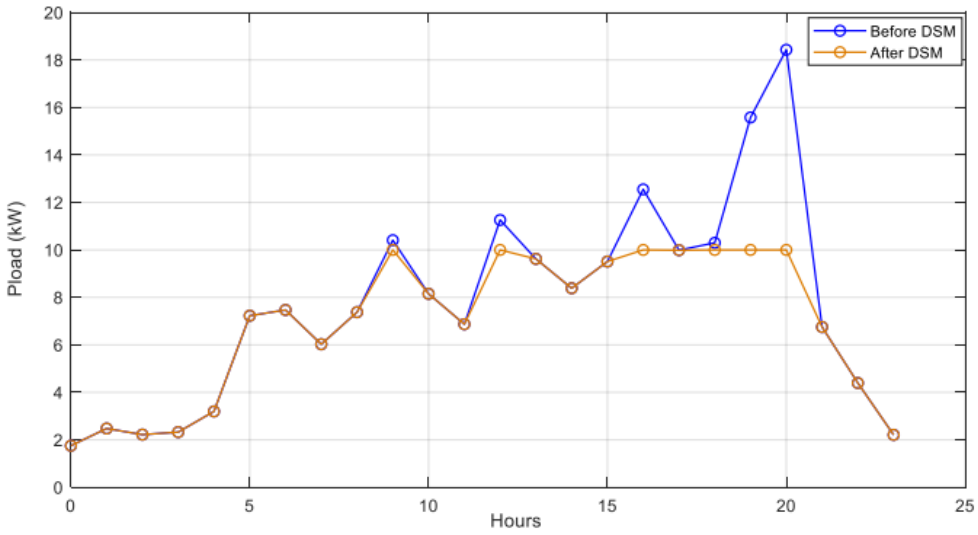


Рисунок 3.9 – Вплив DSM на пікове обмеження на профіль навантаження

Рисунок 3.9 ілюструє вплив, який має обмеження пікових навантажень на годинне навантаження. Синя крива показує початкове навантаження зі значними щоденними коливаннями. Друга крива відображає навантаження після зрізання пікових значень, при якому значення навантаження обмежуються порогом у 10 кВт. Процес зрізання пікових значень обмежує пікове споживання до заданого порогу, тим самим запобігаючи стрибкам напруги в системі та стабілізуючи попит на енергію. Він ефективно утримує навантаження нижче контрольованого рівня, мінімізуючи таким чином потенційну нестабільність та перевантаження енергосистеми.

3.4 Висновки до розділу 3

У ході виконаного дослідження комплексно розглянуто теоретичні, методичні та прикладні аспекти підвищення енергоефективності автономних систем електропостачання на основі ВДЕ. Робота демонструє, що в умовах зростання частки сонячної та вітрової генерації, а також обмеженого або відсутнього доступу до централізованих електричних мереж, автономні та гібридні енергосистеми стають ключовим елементом сталого енергопостачання як побутових, так і промислових споживачів.

Основною проблемою автономних систем на базі ВДЕ залишається стохастичний характер генерації, що призводить до невідповідності між профілями виробництва і споживання електроенергії. У зв’язку з цим особливого значення набуває використання акумуляторних систем накопичення енергії, які виступають центральним елементом підвищення надійності, енергоефективності та автономності. Результати дослідження показують, що інтелектуально кероване накопичення енергії дозволяє істотно скоротити використання резервних дизельних генераторів, знизити витрату палива і мінімізувати експлуатаційні витрати при одночасному підвищенні стійкості системи до несприятливих погодних умов.

Максимальна ефективність автономних систем досягається не за рахунок збільшення встановленої потужності генерації, а за рахунок оптимізації режимів роботи і розподілу енергетичних потоків. Математичні методи оптимізації, включаючи методи найменших квадратів з обмеженнями, змішане цілочисельне лінійне програмування, а також гібридні багатоцільові алгоритми, дозволяють формалізувати складні багатопараметричні залежності і знаходити такі режими функціонування системи, які забезпечують мінімальну собівартість електроенергії, зниження енергетичних втрат і усунення дефіциту електропостачання.

Особливу увагу в дослідженні приділено сучасним інтелектуальним стратегіям управління, включаючи методи на основі дрібно-порядкового ПІД-

регулювання та алгоритмів оптимізації, що імітують поведінку природних систем.

Результати моделювання свідчать про значну перевагу таких стратегій у порівнянні з класичними схемами управління, що виражається в збільшенні коефіцієнта використання сонячної енергії, згладжуванні пікових навантажень і підвищенні загальної енергоефективності автономної системи. Показано, що інтеграція прогнозів погодних умов і профілів споживання в алгоритми управління дозволяє реалізувати адаптивну роботу системи в реальному часі.

Аналіз програмних засобів моделювання та оптимізації підтверджує відсутність універсального інструменту для вирішення всіх завдань, пов’язаних з проектуванням і експлуатацією автономних систем електропостачання. Ефективний інженерний і науковий підхід вимагає поетапного використання різних програмних платформ – від техніко-економічного аналізу конфігурацій до детального динамічного моделювання та оцінки електричних режимів. Такий багаторівневий підхід забезпечує достовірність результатів і знижує ризики помилкових проектних рішень.

В цілому, результати дослідження підтверджують, що акумуляторне накопичення енергії з інтелектуальним управлінням є «золотим стандартом» для сучасних автономних і мікромережевих систем електропостачання. Саме здатність максимально раціонально використовувати кожну накопичену кіловат-годину визначає мінімальну собівартість енергії, високий ступінь автономності та стійкість системи. Отримані висновки можуть бути використані при проектуванні, модернізації та оптимізації автономних енергосистем в умовах енергетичної невизначеності, а також служать основою для подальших досліджень в області інтелектуальних енергетичних систем і цифрового управління ВДЕ.

4. ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ВИКОРИСТАННЯ АВТОНОМНИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ СИСТЕМ НА ОСНОВІ ВДЕ

4.1 Технічні альтернативи

Забезпечення надійного та стабільного електропостачання в умовах територіальної віддаленості, слабкої інфраструктурної зв’язності або високої вразливості централізованих енергомереж залишається одним із ключових інженерних і соціально-економічних завдань сучасності. У подібних умовах традиційна модель електропостачання, заснована на підключенні споживачів до об’єднаної державної енергосистеми, часто виявляється технічно, економічно або фізично нездійсненною. В результаті особливої актуальності набуває розробка і впровадження автономних систем електропостачання, здатних функціонувати незалежно від магістральних мереж і забезпечувати заданий рівень надійності енергопостачання.

Протягом десятиліть в якості основної технічної альтернативи автономним системам на основі ВДЕ використовувалися локальні енергокомплекси на вуглеводневому паливі, перш за все дизельні та газопоршневі електростанції. Дані рішення характеризуються порівняно низькими капітальними витратами, високою керованістю і передбачуваністю вихідної потужності, а також відносною простотою інтеграції в автономні схеми електропостачання. Разом з тим їх експлуатація безпосередньо залежить від стабільності поставок палива, супроводжується високими експлуатаційними витратами, значними логістичними витратами у віддалених регіонах і істотним екологічним впливом, включаючи викиди парникових газів і локальне забруднення навколишнього середовища.

Альтернативним підходом є використання автономних систем електропостачання на базі ВДЕ, таких як сонячні фотоелектричні установки та вітроенергетичні агрегати, як в монотехнологічному, так і в гібридному

виконанні. У порівнянні з традиційними паливними установками, такі системи мають принципово інші техніко-економічні характеристики: вони вимагають більш високих початкових інвестицій, але характеризуються мінімальними експлуатаційними витратами, відсутністю залежності від регулярних поставок палива і потенційно необмеженим терміном служби генеруючих компонентів. Однак стохастичний характер відновлюваних джерел енергії обумовлює необхідність інтеграції систем накопичення енергії та резервних джерел, що ускладнює архітектуру системи і вимагає застосування інтелектуальних алгоритмів управління.

Крім дизельних і газових генераторів, в якості технічних альтернатив АСЕ також розглядаються малі модульні енергетичні установки, включаючи мікротурбінні установки, когенераційні системи, а в окремих випадках – малі гідроелектростанції або ядерні джерела малої потужності. Проте більшість таких рішень або географічно обмежені, або вимагають складної регуляторної та експлуатаційної інфраструктури, що істотно знижує їх застосовність для масового автономного енергопостачання.

Важливим методологічним аспектом є коректне трактування економічної рентабельності автономних енергосистем. На відміну від мережевих енергетичних проектів, де ефективність традиційно оцінюється через термін окупності інвестицій або вартість виробленої електроенергії по відношенню до тарифу централізованої мережі, для автономних систем такий підхід виявляється некоректним. В умовах, коли кінцевий споживач не має фізичної або економічної можливості підключення до державної енергомережі, автономна система електропостачання не має альтернативи у вигляді мережевого тарифу і, отже, не може «окуповуватися» в класичному розумінні цього терміну.

У зв’язку з цим економічна доцільність автономних систем на основі ВДЕ повинна оцінюватися не через призму їх окупності щодо централізованого електропостачання, а шляхом порівняння з альтернативними автономними рішеннями на вуглеводневому паливі. Рентабельність в даному контексті формується за рахунок сукупного зниження витрат на життєвому циклі системи,

мінімізації логістичних ризиків поставок палива, підвищення енергетичної незалежності, стійкості до зовнішніх впливів, а також за рахунок нематеріальних факторів, включаючи екологічну безпеку, зниження операційних ризиків і підвищення надійності енергопостачання критично важливих об’єктів. Саме такий порівняльний і системний підхід дозволяє адекватно оцінити економічну і технічну спроможність автономних енергетичних систем на базі ВДЕ.

4.2 Обґрунтування економічної ефективності використання АСЕ

Коректна економічна оцінка для АСЕ принципово відрізняється від аналізу мережевих енергетичних проектів. В умовах відсутності можливості підключення до централізованої енергомережі економічна ефективність автономної системи не може бути визначена через традиційний показник терміну окупності інвестицій. Замість цього доцільно застосовувати сукупні вартісні показники життєвого циклу, що дозволяють зіставляти альтернативні автономні рішення між собою.

Економічна рентабельність автономних систем електропостачання повинна розглядатися як завдання порівняльної оптимізації. В умовах відсутності альтернативи централізованому електропостачанню найбільш коректним критерієм вибору є мінімізація NPC і TCO при забезпеченні заданого рівня надійності, а також зниження чутливості системи до зовнішніх факторів, таких як зростання цін на паливо або порушення логістичних ланцюжків. Такий підхід дозволяє обґрунтовано стверджувати, що автономні системи на основі ВДЕ, незважаючи на більш високі початкові інвестиції.

4.3 Розрахунок економічної вигоди АСЕ між АСЕ-ВДЕ та АСЕ на вуглецевому паливі

Для аналізу візьмемо АСЕ-ВДЕ для невеликого віддаленого містечка із середньою добовою потужністю 86 кВт добове споживання енергії:

$$86\ \text{кВт} \cdot 24\ \text{год} = 2064,\ \text{кВт·г/добу}$$

річне:

$$2064 \cdot 365 \approx 753\,360,\ \text{кВт·г/год}$$

Враховуючи пікові навантаження (ранок, обід, вечір), припускаємо пікову потужність системи ≈150 кВт (коефіцієнт пікового навантаження ≈1,75 від середнього, типово для житлових/малих поселень). Обидві системи розраховані на цю потужність.

Розрахунки засновані на даних 2025 року (з джерел: ціни на PV ≈2,5 USD/Вт встановленої, BESS ≈ 150 USD/кВтч, дизель-генератори ≈ 700 USD/кВт, паливо ≈ 1 USD/л, витрата $\approx 0{,}3$ л/кВтч). O&M (експлуатаційні та обслуговуючі витрати) враховані. Без урахування доставки палива (як зазначено), інфляції та дисконтування для простоти (кумулятивні витрати лінійні). Термін аналізу – 30 років.

Конфігурація 1: Дизель-генератор 150 кВт (для покриття піків; працює на повному навантаженні для ефективності).

Капітальні витрати (CAPEX):

$$150\ \text{кВт} \cdot 700\ USD/\text{кВт} = 105000\ USD.$$

Операційні витрати (OPEX, щорічні):

Паливо:

$$753360\ \text{кВтг/рік} \cdot 0.3\ л/\text{кВтч} \cdot 1\ USD/л = 226008\ USD.$$

O&M: 20 USD/кВт/рік ($150 \cdot 20 = 3000\ USD$).

Разом OPEX: ≈ 229008 USD/рік.

Рентабельність: Низький CAPEX, але високі OPEX. За 20 років кумулятивні витрати ≈ 4685160 USD (CAPEX + OPEX·20). ROI щодо нульового сценарію (без системи) не застосовується, але в порівнянні з ВДЕ – негативна після break-even, через зростання OPEX.

Конфігурація 2: PV для денної генерації, BESS для зберігання та покриття піків/ночі. Середній сонячний годинник – 4,5 год/добу (типово для помірних широт).

Розмір PV:

$$2064 \text{ кВт} \cdot \text{г} / 4{,}5 \approx 459 \text{ кВт}$$

BESS: 1000 кВтг (для ~12 год автономії на середньому навантаженні, покриття вечірніх піків).

Операційні витрати (OPEX, щорічні): Немає палива. O&M: 10 USD/кВт/рік для PV:

$(459 \cdot 10 = 4590$ USD) + 5 USD/кВтч/рік для BESS $(1000 \cdot 5 = 5000\ USD)$. Разом ≈ 9590 USD/рік.

Рентабельність: Розрахована як повернення інвестицій за рахунок економії палива в порівнянні з базовим сценарієм (дизель). Річні «заощадження» ≈ 219421 USD (різниця OPEX з дизелем).

За 20 років:

$$ROI = \frac{(219421 \cdot 20 - 1297500)}{1297500} \approx 238\%$$

Тобто, позитивна рентабельність після ≈ 6 років.

Економічна рентабельність автономних енергосистем на основі ВДЕ має оцінюватись виключно у порівнянні з альтернативними автономними системами на вуглеводневому паливі. В умовах віддаленого споживача саме гібридні ВІЕ-системи забезпечують мінімальні сукупні витрати життєвого циклу, а їхня висока початкова вартість компенсується різким зниженням експлуатаційних витрат уже в перші роки експлуатації.

Економічний зміст АС-ВДЕ полягає у:

- мінімізації NPC;
- зниженні TCO;
- усуненні залежності від палива.

Вже через ≈6 років автономна система на ВДЕ стає економічно кращою порівняно з дизельною альтернативою тієї ж потужності.

При горизонті експлуатації 15-20 років різниця у витратах досягає кратних величин, навіть без урахування доставки палива та екологічних факторів.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

Дослідження сучасного стану, принципів функціонування та методів підвищення ефективності АСЕ дозволяє зробити низку узагальнюючих висновків, що мають як теоретичне, так і прикладне значення для подальшого розвитку розподіленої енергетики, зокрема в умовах України.

АСЕ на основі ВДЕ є технічно і концептуально зрілим напрямом розвитку енергетики, орієнтованим на забезпечення надійного енергопостачання споживачів в умовах відсутності або недоступності централізованих електричних мереж. Ключовою особливістю таких систем є використання локально доступних енергетичних ресурсів – сонячного випромінювання та вітрового потоку – у поєднанні з накопичувачами енергії та резервними джерелами генерації. У світовому масштабі автономні та гібридні енергосистеми набули широкого поширення у віддалених населених пунктах, на острівних територіях, у північних регіонах, а також на промислових та інфраструктурних об’єктах з підвищеними вимогами до енергетичної надійності. В Україні актуальність автономних систем суттєво зросла останніми роками внаслідок руйнування енергетичної інфраструктури, перевантаження мереж та об’єктивних обмежень на відновлення централізованого електропостачання у низці регіонів, що робить автономні ВДЕ-системи важливим елементом енергетичної стійкості та повоєнного відновлення країни.

Підвищення ефективності АСЕ насамперед пов’язане із завданнями оптимізації їх структури та режимів роботи. Сучасні автономні енергосистеми являють собою багатокомпонентні і об’єкти, в яких процеси генерації, накопичення, перетворення і споживання електроенергії протікають у взаємозалежній формі. Оптимізація роботи таких систем включає вибір раціональної конфігурації обладнання, оптимальне розподілення потужності між джерелами, управління зарядом і розрядом накопичувачів, а також адаптацію режимів роботи до графіка навантаження споживача. Особливого значення набуває узгодження стохастичного характеру вироблення ВДЕ з

детермінованими та піковими режимами електроспоживання, що потребує застосування інтелектуальних алгоритмів керування та методів багатокритеріальної оптимізації.

Ключовим інструментом підвищення ефективності АСЕ є застосування програмно-математичних моделей, що дозволяють формалізувати фізичні, енергетичні та економічні умови, що є у системі. У ході досліджень та практичних розробок широко використовуються спеціалізовані програмні засоби, кожне з яких орієнтоване на вирішення певного класу завдань. Економіко-технічна оптимізація конфігурації автономних систем та розрахунок показників NPC, LCOE та TCO ефективно реалізуються в середовищах HOMER Pro та SAM. Деталізоване моделювання фотоелектричних систем виконується з використанням PVsyst, у той час як електротехнічний аналіз та дослідження режимів роботи генераторів, накопичувачів та перетворювальної апаратури доцільно проводити в Matlab/Simulink з використанням бібліотек Simscape та SimPowerSystems, а також у TRNSYS. Для мережного та динамічного аналізу більш складних мікромереж застосовуються PowerFactory та PSS/E. Використання сукупності цих інструментів дозволяє перейти від концептуальних техніко-економічних оцінок до детального мультифізичного та мультидисциплінарного аналізу автономних енергосистем.

Зіставлення наукових праць та галузевих досліджень, опублікованих у період з 2017 по 2025 роки, демонструє стійку еволюцію підходів до проектування автономних систем електропостачання. Ранні дослідження більшою мірою були зосереджені на доказі технічної реалізованості ВДЕ-систем та порівнянні їх із дизельними електростанціями за показником вартості електроенергії. Свіжі роботи акцентують увагу на системній оптимізації, інтеграції накопичувачів енергії, обліку невизначеностей кліматичних та навантажувальних факторів, а також на застосуванні гібридних обчислювальних методів, що поєднують класичні чисельні підходи з ймовірнісними та машинно-навчальними алгоритмами. Сучасні дослідження підтверджують, що саме

гібридні архітектури з інтелектуальним управлінням забезпечують найкраще поєднання енергетичної ефективності, надійності та економічної доцільності.

Для підвищення енергоефективності, розподілу потужності та мінімізації витрат, у літературі та дослідженнях виділяються такі математичні методи. Ці підходи застосовуються для підбору розмірів компонентів, керування енергією та адаптації до навантажень споживача, включаючи гібридні конфігурації зВДЕ, резервними генераторами та акумуляторами. Нижче наведено ключові методи без детального математичного опису, з акцентом на їх застосування в автономних системах:

- Лінійне програмування та змішане цілечисленне лінійне програмування MILP: Використовуються для мінімізації витрат на встановлення та експлуатацію, з урахуванням лінійних обмежень на потужність та бюджет. Застосовуються у завданнях підбору технологій та кластеризації локацій мікромереж.
- Оптимізація роєм частинок PSO: Біо-інспірований метод для безперервної оптимізації, який часто застосовується для розподілу потужності в реальному часі та мінімізації витрати палива в гібридних системах.
- Метод найменших квадратів з обмеженнями рівності та нерівності LSM з ECLS/ICLS: Розширення LSM для завдань з лінійними обмеженнями, включаючи мінімізацію помилок потужності в системах з навантаженнями, що перемикаються.
- Constrained Grey-Box Optimization p-ARGONAUT: Гібридний метод для багатоцільової оптимізації із сурогатними моделями, що ідентифікуються LSM, у системах із частково невідомими рівняннями.
- APO FO-PID: Комбінація дробового PID для нелінійного контролю та APO для налаштування параметрів, що використовується у розподілі енергії гібридних систем для зниження палива та викидів.

Ці методи часто комбінуються (MILP з PSO) для врахування невизначеностей, таких як погода та навантаження, та забезпечують зниження витрат на 20-30% в автономних системах. За даними від моделей, APO FO-PID

підвищує енергоефективність автономних електричних систем до 40%, на відміну від не оптимованої.

Проведене порівняння АСЕ-ВДЕ та автономної системи на вуглеводневому паливі однакової потужності демонструє, що, незважаючи на більш високі капітальні витрати, ВДЕ-комплекси забезпечують суттєве зниження сукупних витрат життєвого циклу. Вже в перші роки експлуатації досягається точка економічної рівності, після якої подальша експлуатація дизельних систем призводить до кратного зростання витрат унаслідок постійного споживання палива. Для віддалених містечок та селищ України це означає можливість довгострокового зниження фінансового навантаження, підвищення енергетичної незалежності та стійкості до зовнішніх економічних та логістичних ризиків.

Загалом результати дослідження підтверджують, що підвищення ефективності автономних систем електропостачання має розглядатися як комплексне інженерно-економічне завдання, що ґрунтується на оптимізації архітектури системи, застосуванні адекватних математичних моделей та коректних економічних критеріїв оцінки. АСЕ-ВДЕ є не тимчасовою альтернативою, а стратегічним елементом сталого розвитку енергетики України та світу, забезпечуючи надійність, адаптивність та економічну доцільність енергопостачання в умовах зростаючої невизначеності та інфраструктурних обмежень.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. International Renewable Energy Agency (IRENA), Renewable Capacity Statistics 2025 - звіт з даними щодо доданих потужностей сонячної, вітрової та інших ВДЕ за 2024-2025 р. URL: https://www.irena.org/News/pressreleases/2025/Mar/Record-Breaking-Annual-Growth-in-Renewable-Power-Capacity (Дата звернення 29.09.2025)

2. Share of energy consumption from renewable sources in Europe. URL: https://www.eea.europa.eu/en/analysis/indicators/share-of-energy-consumption-from

3. «Electricity Market Report 2023» URL: https://iea.blob.core.windows.net/assets/255e9cba-da84-4681-8c1f-458ca1a3d9ca/ElectricityMarketReport2023.pdf (Дата звернення 29.09.2025)

4. SOLARPOWER EUROPE. «European Market Outlook for Battery Storage 2024-2028». Веб-документ. URL: https://cdn.rinnovabili.it/wp-content/uploads/2024/06/1424_SPE_BESS_report_10_mr_d069de2e2e.pdf (Дата звернення 29.09.2025)

5. Global Renewables Watch: A Temporal Dataset of Solar and Wind Energy Derived from Satellite Imagery. URL: https://arxiv.org/abs/2503.14860 (Дата звернення 01.10.2025)

6. Постанова Національної комісії, що здійснює державне регулювання у сферах енергетики та комунальних послуг (НКРЕКП) «Про затвердження Порядку продажу та обліку електричної енергії, виробленої активними споживачами, та розрахунків за неї»: постанова від 29 грудня 2023 р. № 2651 // База даних «Законодавство України» / Верховна Рада України. URL: https://zakon.rada.gov.ua/rada/show/v2651874-23#Text (Дата звернення 01.10.2025)

7. NET METERING, NET BILLING: ефективні механізми підтримки виробників «зеленої» електроенергії. Веб-стаття. URL: https://www.solargarden.com.ua/net-metering-net-billing-efektyvni-mehanizmy-pidtrymky-vyrobnykiv-zelenoi-elektroenerhii/ (Дата звернення 01.10.2025)

8. Гнилиця М.Б. Розробка автономної комбінованої електростанції: робота на здобуття кваліфікаційного ступеня магістра: спец. 141 – електроенергетика, електротехніка та електромеханіка/ наук. кер. О. А. Буняк. Тернопіль: Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, 2025. 76 с. URL: https://elartu.tntu.edu.ua/handle/lib/48489 (Дата звернення 02.10.2025)

9. Mohamed, R.G., Hassan, A.A. & Abdel Aleem, S.H.E. A modified energy management strategy for PV/diesel hybrid system to reduce diesel consumption based on artificial protozoa optimizer. Sci Rep 15, 4440 (2025). URL: https://doi.org/10.1038/s41598-025-87716-y (Дата звернення 01.10.2025)

10. Aziz AS, Tajuddin MFN, Adzman MR, Ramli MAM, Mekhilef S. Energy Management and Optimization of a PV/Diesel/Battery Hybrid Energy System Using a Combined Dispatch Strategy. Sustainability. 2019; 11(3):683. URL: https://doi.org/10.3390/su11030683 (Дата звернення 01.10.2025)

11. Akbar Maleki, Modeling and optimum design of an off-grid PV/WT/FC/diesel hybrid system considering different fuel prices, International Journal of Low-Carbon Technologies, Volume 13, Issue 2, June 2018, Pages 140–147, https://doi.org/10.1093/ijlct/cty006 (Дата звернення 01.10.2025)

12. Sabreen Farouk, Adel Elsamahy, Shaimaa A. Kandil. ‘Power management and optimization of a hybrid power system for remote communities: a case study’ URL: https://www.researchgate.net/publication/396740614_Power_management_and_optimization_of_a_hybrid_power_system_for_remote_communities_a_case_study (Дата звернення 01.10.2025)

13. Д.О. Остренко, О.Ю. Кораллов, «АНАЛІЗ ВПЛИВУ КУТА НАХИЛУ СОНЯЧНИХ ПАНЕЛЕЙ НА РОБОТУ ЕЛЕКТРИЧНОЇ МЕРЕЖІ З ВИКОРИСТАННЯМ ВДЕ», ISSN 2074-2630 Наукові праці ДонНТУ. Серія: «Електротехніка і енергетика» №2(23). 2020. ДНТУ. URL: https://elen.donntu.edu.ua/2074-2630-2020-2-70-76.pdf (Дата звернення 01.10.2025)

14. Kareri, Tareq, ‘Modeling and simulation of a hybrid PV/wind/battery storage off-grid power system’ (2017). Graduate Research Theses & Dissertations. 3991. https://huskiecommons.lib.niu.edu/allgraduate-thesesdissertations/3991 (Дата звернення 02.10.2025)

15. Рибак О. В. Підвищення рівня енергоефективності автономної електроустановки : кваліфікаційна робота бакалавра спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» / наук. керівник С. В. Башлій. Запоріжжя: ЗНУ, 2024. 44 с. URL: https://dspace.znu.edu.ua/jspui/handle/12345/20165 (Дата звернення 29.09.2025)

16. Anh-Tuan Tran, Minh Phuc Duong, Pham Truong, Jae Woong Shim, Chee Peng Lim, An improved arctic puffin optimization-based multi-objective approach with novel cascade dual FOPID control for frequency regulation in standalone microgrids, Energy Reports, Volume 14, 2025, Pages 4976-4991, ISSN 2352-4847, URL: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352484725006602 (Дата звернення 02.10.2025)

17. Романенко, Т.О. «Оптимізація за станом систем акумулювання енергії в Microgrid» магістерська дис.: 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка / Романенко Тетяна Олександрівна. – Київ, 2024. – 106 с. URL: https://ela.kpi.ua/items/80195435-e87f-4508-ac61-de9a38244dca (Дата звернення 01.10.2025)

18. Гордійчук, А. О. Моделювання енергетичних систем на основі відновлюваних джерел енергії : дипломна робота … бакалавра : 124 Системний аналіз / Гордійчук Анастасія Олександрівна. – Київ, 2025. – 167 с. URL: https://ela.kpi.ua/items/b0e4f69a-a93e-4528-a6fe-89bd1f13d1cf (Дата звернення 01.10.2025)

19. Habib, A. H., Disfani, V. R., Kleissl, J., & de Callafon, R. A. (2017). Optimal switchable load sizing and scheduling for standalone renewable energy systems. Solar Energy, 144, 707-720. URL: https://arxiv.org/abs/1702.00870 (Дата звернення 02.10.2025)

20. http://www.seas.ucla.edu/~vandenbe/133A/lectures/cls.pdf

21. Chaoyang Zhu, Yunxiang Zhang, Mengxia Wang, Jinxin Deng, Yiwei Cai, Wei Wei, Mengxing Guo, Optimization, validation and analyses of a hybrid PV-battery-diesel power system using enhanced electromagnetic field optimization algorithm and ε-constraint, Energy Reports, Volume 11, 2024, Pages 5335-5349, ISSN 2352-4847, URL: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352484724002518 (Дата звернення 01.10.2025)

22. Burcu Beykal, Fani Boukouvala, Christodoulos A. Floudas, Efstratios N. Pistikopoulos, Optimal design of energy systems using constrained grey-box multi-objective optimization, Computers & Chemical Engineering, Volume 116, 2018, Pages 488-502, ISSN 0098-1354, https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0098135418300841 (Дата звернення 01.10.2025)

23. Amr Abbass, Hybrid renewable energy microgrid optimization: an analysis of system performance and cost-efficiency using Python-generated custom code for Diesel-wind-solar configurations, Energy Storage and Saving, 2025, ISSN 2772-6835, https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2772683525000330 (Дата звернення 01.10.2025)