

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»
ФАКУЛЬТЕТ ЕЛЕКТРОЕНЕРГОТЕХНІКИ ТА АВТОМАТИКИ
КАФЕДРА ВІДНОВЛЮВАНИХ ДЖЕРЕЛ ЕНЕРГІЇ**

«На правах рукопису»
УДК 621.311

До захисту допущено:
Завідувач кафедри
Василь БУДЬКО
« » 20 р.

**Магістерська дисертація
на здобуття ступеня магістра
за освітньо-професійною програмою «Нетрадиційні та відновлювані
джерела енергії»
зі спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та
електромеханіка»
на тему: «Резервування потужності енергосистеми з відновлюваними
джерелами енергії»**

Виконав:
студент II курсу, групи ЕД-21мп
Лазорко Микола Іванович

Науковий керівник:
докт. техн. наук, доцент,
Кузнецов Микола Петрович

Рецензент:
канд. техн. наук, доцент каф. АЕ,
Дмитренко Олександр Олексійович

Засвідчую, що у цій магістерській
дисертації немає запозичень з праць
інших авторів без відповідних посилань.
Студент _____

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
Факультет електроенерготехніки та автоматики
Кафедра відновлюваних джерел енергії

Рівень вищої освіти – другий (магістерський)

Спеціальність – 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

Освітньо-професійна програма «Нетрадиційні та відновлювані джерела енергії»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

_____ Василь БУДЬКО

«___» _____ 20__ р.

ЗАВДАННЯ
на магістерську дисертацію студенту
Лазорку Миколі Івановичу

1. Тема дисертації «Резервування потужності енергосистеми з відновлюваними джерелами енергії», науковий керівник дисертації докт. техн. наук, доцент, Кузнєцов Микола Петрович, затверджені наказом по університету від «03» листопада 2023 р. № 5131-с
2. Термін подання студентом дисертації «12» січня 2024 р.
3. Об'єкт дослідження – комбіноване використання відновлюваних джерел енергії разом з резервним джерелом живлення та системою накопичення енергії.
4. Вихідні дані: графік покриття споживання та генерації, вартість обладнання.
5. Перелік завдань, які потрібно розробити: дослідити теоретичну базу та наявні роботи по темі; розробити алгоритм розрахунку балансу потужності системи на основі відновлюваних джерел енергії, системи накопичення енергії та резервного джерела живлення; провести розрахунок оптимальності підбору кожної складової системи.

6. Перелік графічного матеріалу – 1 презентація
 7. Орієнтовний перелік публікацій: Біометан як засіб балансування мережі;
Балансування енергосистем з великою часткою відновлюваної енергетики;
Перовскіти. Технологія та її ефективність
 8. Дата видачі завдання «01» вересня 2023 р.
-

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання магістерської дисертації	Термін виконання етапів магістерської дисертації	Примітка
1	Дослідження теоретичної бази та наявних робіт по темі	01.09.2023- 24.09.2023	Вик.
2	Написання програми розрахунку енергетичного балансу в програмному середовищі MATLAB	25.09.2023- 15.10.2023	Вик.
3	Написання розділу 3 – основних розрахунків	16.10.2023- 05.11.2023	Вик.
4	Написання розділів 4 та 5 – стартап проєкту та охорони праці	06.11.2023- 19.11.2023	Вик.
5	Написання висновків та вступу	20.11.2023- 03.12.2023	Вик.
6	Оформлення дисертації	04.12.2023- 24.12.2023	Вик.
7	Внесення правок	25.12.2023- 07.01.2024	Вик.

Студент _____

Микола ЛАЗОРКО

Науковий керівник _____

Микола КУЗНЄЦОВ

РЕФЕРАТ

Магістерська дисертація представлена у вигляді пояснювальної записки, що складається з вступу, п'яти розділів, загальних висновків, джерел використаної літератури (31 найменування) та додатків. Загальний об'єм роботи складає 86 ст., з яких 67 ст. основного тексту, 20 рисунків, 9 таблиць та 3 додатки.

Актуальність теми. Проблема комбінованого використання відновлюваних джерел енергії разом з акумуляторними батареями та резервним джерелом живлення стала відчутною протягом останніх двох років саме на території України. Немає одного чітко визначеного принципу підбору такого роду електричної станції, що дає поле для великої кількості різноманітних технічних рішень, які базуються на різному підґрунті.

Мета та задачі дослідження. Метою даної магістерської дисертації є встановлення параметрів комплексної електростанції для забезпечення власних потреб споживача на основі відновлюваних джерел енергії.

Об'єкт дослідження. Перетворення енергії відновлюваних джерел в комплексній системі з блоком накопичення та резервним джерелом.

Предмет дослідження. Режимні параметри комплексної системи з блоком накопичувачем та резервним джерелом.

Методи дослідження. Створення програми розрахунку балансу потужностей в програмному забезпеченні MATLAB та робота з отриманим балансом з урахуванням вартості ключових елементів системи, що розраховується.

Наукова новизна роботи. Удосконалено метод енергетичного узгодження обладнання та устаткування для реалізації комбінованих систем за рахунок врахування специфіки покриття навантаження різними відновлюваними джерелами.

Практичне значення роботи. Отримано програмний продукт дослідження енергетичного балансу системи на основі графіків покриття споживання та генерації даної системи та надання чіткого співвідношення

різних джерел енергії в одній системі з урахуванням їх технічних та економічних особливостей.

Ключові слова. Відновлювані джерела енергії, сонячна енергетика, комбіноване використання джерел енергії, системи накопичення енергії, резервне джерело живлення.

Публікації. Результати магістерської дисертації також представлені в наступних наукових публікаціях:

1. Біометан як засіб балансування мережі / М. І. Лазорко // Міжнародний науково-технічний журнал "Сучасні проблеми електроенерготехніки та автоматики". – 2022.
2. Балансування енергосистем з великою часткою відновлюваної енергетики / М. І. Лазорко // XXIV Міжнародна науково-практична онлайн конференція “Відновлювана енергетика та енергоефективність у XXI столітті”. – 2023. с. 92-93.
3. Перовскіти. Технологія та її ефективність / М. І. Лазорко // Науково-прикладний журнал «Відновлювана енергетика». – 2023. №3. с. 66-74.

ANNOTATION

The master's dissertation is presented in the form of an explanatory note consisting of an introduction, five chapters, general conclusions, references (31 titles), and appendices. The total volume of the work is 86 pages, including 67 pages of the main text, 20 figures, 9 tables, and 3 appendices.

Relevance of the topic. The problem of the combined use of renewable energy sources together with batteries and a backup power source has become noticeable in the last two years in Ukraine. There is no one clearly defined principle for selecting this kind of power plant, which gives room for a large number of different technical solutions based on different grounds.

The purpose and objectives of the study. The purpose of this master's thesis is to establish the parameters of an integrated power plant to meet the consumer's own needs based on renewable energy sources.

Object of research. Conversion of energy from renewable sources in an integrated system with a storage unit and a backup source.

Subject of research. Operating parameters of an integrated system with a storage unit and a backup source.

Research methods. Creating a program for calculating the balance of capacities in MATLAB software and working with the resulting balance, taking into account the cost of the key elements of the system being calculated.

Scientific novelty of the work. The method of energy coordination of equipment and facilities for the implementation of combined systems has been improved by taking into account the specifics of load coverage by various renewable sources.

Practical significance of the work. A software product for studying the energy balance of a system based on the schedules of consumption and generation

coverage of a given system and providing a clear ratio of different energy sources in one system, taking into account their technical and economic features, was obtained.

Keywords. Renewable energy sources, solar energy, combined use of energy sources, energy storage systems, and backup power supply.

Publications. The results of the master's thesis are also presented in the following scientific publications:

1. Biomethane as a means of balancing the network / M. Lazorko // International Scientific and Technical Journal "Modern Problems of Electric Power Engineering and Automation." - 2022.
2. Balancing of power systems with a large share of renewable energy / M. Lazorko // XXIV International Scientific and Practical Online Conference "Renewable Energy and Energy Efficiency in the XXI Century." - 2023. pp. 92-93.
3. Perovskites. Technology and its efficiency / Lazorko M. // Scientific and applied journal "Renewable Energy." - 2023. №3. pp. 66-74.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	11
РОЗДІЛ 1 АНАЛІЗ МОЖЛИВОСТЕЙ ЗАСТОСУВАННЯ ЕНЕРГІЇ СОНЯЧНОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ В КОМПЛЕКСНИХ СИСТЕМАХ	13
1.1 Ресурси сонячної енергетики, її розвиток.....	13
1.2 Основні складові, що впливають на сонячну генерацію.....	17
1.3 Останні тренди в розвитку сонячних фотомодулів	22
1.4 Силові електронні перетворювачі у фотоелектричних системах	28
РОЗДІЛ 2 СИСТЕМИ НАКОПИЧЕННЯ ЕНЕРГІЇ. ТЕХНОЛОГІЇ, ПРИНЦИПИ ЇХ РОБОТИ.....	41
РОЗДІЛ 3 ВИКОРИСТАННЯ АКУМУЛЯТОРНИХ БАТАРЕЙ ТА ДИЗЕЛЬ-ГЕНЕРАТОРА ДЛЯ РЕЗЕРВУВАННЯ ПОТУЖНОСТІ ЕНЕРГОСИСТЕМИ	48
3.1 Розрахунок енергетичного балансу об'єкту	48
3.2 Економічний розрахунок.....	58
3.3 Кошторис автономної станції з дизель-генератором.....	68
РОЗДІЛ 4 РОЗРОБЛЕННЯ СТАРТАП ПРОЄКТУ.....	70
4.1 Розробка програми оптимізації використання сонячної станції разом з дизель-генератором.....	70
4.2 Основна ідея проєкту	70
4.3 Переваги стартап проєкту.....	71
4.4 Технологічний аудит стартап проєкту	71
4.5 Огляд ринку для старту проєкту	72
РОЗДІЛ 5 ОХОРОНА ПРАЦІ	74

ВИСНОВОК	76
СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ.....	78
ДОДАТКИ.....	83
Додаток А Код програми	83
Додаток Б Схематичне зображення взаємозв'язків елементів комбінованої системи	85
Додаток В Схема приєднань електричного обладнання системи.	86

ВСТУП

У сучасному світі, питання використання відновлюваних джерел енергії набуває все більшого значення в контексті збереження природних ресурсів та боротьби зі зміною клімату. Два основних гравці в цій області - сонячні та вітрові електростанції, представляють собою потужний рушій у напрямку створення сталого та екологічно чистого енергетичного майбутнього.

Сонячна енергія - це одне з найбільш доступних та розповсюджених джерел відновлюваної енергії. Захоплюючи сонячне випромінювання, сонячні панелі перетворюють його на електричну енергію без шкідливих викидів та відходів. Це робить сонячну енергію не лише екологічно чистою, але й дуже ефективною для виробництва електроенергії [1].

Середньорічна кількість сонячної радіації, що сумарно потрапляє на одиницю площі поверхні в Україні за даними атласу енергетичного потенціалу відновлюваних джерел енергії України становить $1070 \text{ кВт} \cdot \text{год} / \text{м}^2$ на півночі та $1400 \text{ кВт} \cdot \text{год} / \text{м}^2$ на півдні. Наукові дослідження показують, що для України теоретична встановлена потужність СЕС може становити $82\,768 \text{ МВт}$, а відповідно річний потенціал виробітку електричної енергії становить близько $100 \text{ млрд. кВт} \cdot \text{год} / \text{рік}$ [2].

Завдяки сонячним та вітровим електростанціям, ми маємо можливість знижувати залежність від видобутку та споживання вугілля, природного газу та інших забруднюючих видів енергії. Це допомагає зменшити викиди парникових газів та сприяє збереженню природних ресурсів. Більше того, відновлювана енергетика сприяє створенню робочих місць та розвитку новітніх технологій.

Проте дані технології мають свою специфіку, а саме нестабільну генерацію, яка в першу чергу залежить від погодних умов та пір року. Тому для збільшення надійності таких станцій та покращення показників якості роботи всієї енергосистеми, широкого розповсюдження починають набирати

системи накопичення енергії для резервування потужності ВДЕ, що в комплексі значно підвищує їх надійність та ефективність.

В даній роботі розглядається комплексне поєднання сонячної електростанції та акумуляторних батарей в комбінації з резервним джерелом живлення, а саме дизель-генератором. Така комбінація джерел живлення дозволяє максимально повністю забезпечити споживача електроенергією в будь-який момент часу з високою надійністю. В цій роботі представлені шляхи вибору такого типу станцій та оптимізація спільного використання всіх джерел енергії як з практичної, так і з економічної точки зору.

РОЗДІЛ 1 АНАЛІЗ МОЖЛИВОСТЕЙ ЗАСТОСУВАННЯ ЕНЕРГІЇ СОНЯЧНОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ В КОМПЛЕКСНИХ СИСТЕМАХ

1.1 Ресурси сонячної енергетики, її розвиток

Сонячна фотоелектрична енергетика залишається основним джерелом розширення світових потужностей відновлюваної енергетики у 2023 році, на неї припадає 65% приросту, а розподілені системи, включаючи житлові та комерційні, становлять майже половину світового розширення фотоелектричних потужностей. Після вторгнення Росії в Україну світова енергетична криза призвела до зростання оптових і роздрібних цін на електроенергію в багатьох частинах світу, що зробило малі сонячні фотоелектричні системи більш економічно привабливими для побутових і комерційних споживачів. Політики в багатьох країнах, особливо в Європі, шукають можливості для негайної диверсифікації від імпортованого викопного палива, покращуючи політичне середовище для розподілених сонячних фотоелектричних систем, які можуть бути швидко встановлені.

Загальний приріст потужностей відновлюваної енергетики зріс майже на 13% до майже 340 ГВт у 2022 році. Однак сонячна фотоелектрична енергетика була єдиною технологією, яка побила рекорд розгортання попереднього року, з чистим приростом майже 220 ГВт - на 35% більше, ніж у 2021 році. Розширення лише в Китаї та Європейському Союзі забезпечило понад 85% зростання річного приросту потужностей сонячних електростанцій [3].

У 2023 році ринки сонячних фотоелектричних систем ЄС піднялися на хвилі, спричиненій політичними та енергетичними потрясіннями, що виникли у 2022 році. Різке зростання цін на електроенергію та газ, а також побоювання перебоїв з енергопостачанням, спричинені російським вторгненням в Україну, призвели до серйозних проблем з енергетичною безпекою та поставили сонячну енергетику в абсолютно новому світлі, завдяки чому 2022 рік став роком визнання сонячної фотоелектрики як ключової, економічно ефективної та швидко впроваджуваної технології для виробництва електроенергії. Як

ніколи раніше, європейці відкрили для себе потенціал сонячної енергії для електрифікації своїх систем опалення за допомогою теплових насосів. Багато європейських політиків визнали сонячну енергію важливим інструментом для забезпечення доступу громадян до екологічно чистої та доступної електроенергії. У 2023 році наслідки цієї зміни парадигми стали ще більш очевидними - з новими рекордними установками по всьому Європейському Союзу, але попереду ще багато викликів. Попит на сонячні фотоелектричні станції на початку 2023 року все ще стрімко зростає, оскільки багато замовлень, розміщених у 2022 році, були реалізовані лише протягом 2023 року. Однак, порівняно з піком кризи у 2022 році, ціна на електроенергію значно знизилася протягом 2023 року. Наприклад, у Німеччині ціна на електроенергію для населення зросла до 58 євроцентів/кВт·год у жовтні 2022 року і різко впала протягом 12 місяців до 39 євроцентів/кВт·год. Хоча ціни все ще вищі за попередні, відчуття нагальності зменшилося, зокрема, через зникнення страху перед вимкненням світла. У поєднанні з високими темпами інфляції попит на сонячні фотоелектричні системи для домогосподарств сповільнився у другій половині 2023 року. Аналогічну тенденцію можна спостерігати і в ціні оптового ринку електроенергії.

Проте, навіть при поверненні оптових цін на електроенергію до рівня 2019-2021 років після підвищення у 2022 році, LCOE (приведена вартість енергії) сонячної енергетики є порівняно низьким - і інвестиції у велику енергетику залишаються привабливими в багатьох країнах ЄС при сьогоднішніх високих відсоткових ставках, якби не складні умови фінансування, отримання дозволів та підключення до електромережі.

Як результат, у 27 країнах-членах було встановлено 55,9 ГВт нових сонячних фотоелектричних станцій, що на 40% більше, ніж у 2022 році, і це вже третій рік поспіль є новим рекордом. Привертає увагу той факт, що третій рік поспіль річний ринок ЄС-27 зростає щонайменше на 40% у порівнянні з попереднім роком. Цей показник також знаменує собою 6-й рік поспіль, коли ринок ЄС зростає порівняно з попереднім роком. Озираючись на початок цієї

серії, у 2017 році розмір ринку становив лише 5,1 ГВт, що менше однієї десятої сьогоднішніх обсягів. Лише після скасування заходів торговельного захисту на ринку сонячної енергетики у 2018 році ринок почав активно зростати [4].

Україна має сприятливі умови для використання сонячної енергії, оскільки середньорічна кількість сонячної радіації на її території варіюється від 1070 до 1400 кВт·год/м². Розподіл кліматичних показників підтверджує високий радіаційний режим, змінюючись від 1690 – 1850 годин у західних районах до 2150 – 2450 годин на півдні та узбережжях Чорного та Азовського морів. Кількість сумарної радіації, яка потенційно може бути використана, коливається від 1064,9 кВт·год/м² на рік на заході до 1551,7 кВт·год/м² на півдні Криму. Розрахунки теоретичної встановленої потужності сонячних електростанцій (СЕС) враховують не лише значення сонячної радіації, а й доступну площу для будівництва та коефіцієнт потужності СЕС. За результатами досліджень, теоретична встановлена потужність СЕС в Україні становить 82 768 МВт, а річний потенціал виробітку електроенергії від СЕС оцінюється на близько 100 млрд. кВт·год/рік.

Станом на 31 грудня 2021 року встановлена потужність сектору відновлюваної енергетики України становила 9 655,9 МВт, причому значне зростання спостерігалось на домашніх сонячних електростанціях, які забезпечили 36,4% нових потужностей відновлюваної енергетики у 2021 році. Загальна потужність домашніх сонячних систем досягла 1 205,1 МВт, тоді як у секторі промислової сонячної енергетики спостерігалось незначне зростання на 305,5 МВт. Географічний розподіл об'єктів відновлюваної енергетики відповідає природному потенціалу кожного регіону, а вітрові електростанції зосереджені в південних та південно-східних областях, переважно вздовж узбережжя Чорного та Азовського морів.

Станом на початок 2022 року Дніпропетровська (1 350,06 МВт), Херсонська (1 139,65 МВт) та Миколаївська (1 121,16 МВт) області лідирують за встановленими потужностями відновлюваної енергетики, що становить 37,3% від загального обсягу по країні. Помітне зростання у 2021 році відбулося

в Миколаївській (168,7 МВт), Одеській (149,1 МВт), Херсонській (145 МВт) та Запорізькій (98,8 МВт) областях. Ландшафт відновлюваної енергетики в Україні демонструє орієнтацію на домашню сонячну енергетику, що робить значний внесок у загальне зростання сектору.

Війна в Україні мала значний вплив на сектор відновлюваної енергетики країни. Російські війська, окрім обстрілів міст, активно намагалися знищити критично важливу енергетичну інфраструктуру, включаючи об'єкти атомної енергетики, лінії електропередач та електростанції відновлюваної енергетики. Станом на серпень 2022 року постраждало 30-40% об'єктів відновлюваної енергетики в південних і південно-східних регіонах, що еквівалентно 1 120-1 500 МВт встановленої потужності.

Фінансова криза в енергетичному секторі загострилася через війну, а брак коштів став нагальною проблемою для всіх сегментів української енергосистеми. Ця фінансова напруга особливо сильно вплинула на сектор відновлюваної енергетики, поставивши під загрозу його виживання. Незважаючи на неотримання повної оплати за поставлену у 2021 році електроенергію, виробники відновлюваної енергії, зокрема сонячної та вітрової, продовжували нести операційні витрати. Однак фінансові обмеження стали більш очевидними, оскільки державні компанії, відповідальні за розрахунки з виробниками ВДЕ, такі як ДП "Гарантований покупець" та НЕК "Укренерго", мали достатньо коштів, що викликало питання щодо затримки платежів.

Війна спричинила дискусії про призупинення дії "зеленого" тарифу, що створює ризик банкрутства для виробників відновлюваної енергії та ставить під загрозу енергетичну безпеку України. Скасування тарифу може призвести до втрати понад 8 ГВт потужностей відновлюваної енергетики, що загострить енергетичні проблеми країни. Реальні ринкові ціни на електроенергію, значно вищі за місцеві ціни, та конкурентоспроможність існуючого "зеленого" тарифу до 2030 року роблять сектор життєво важливим як для енергетичної безпеки, так і для економічної вигоди [5].

Незважаючи на ці виклики, серед позитивних зрушень - синхронізація енергосистем України та Молдови з енергосистемою континентальної Європи ENTSO-E та збільшення пропускної спроможності до сусідніх країн. Схвалення Європейською Комісією у травні 2022 року плану REPowerEU, спрямованого на збільшення частки відновлюваної енергетики в ЄС до 2030 року, відкриває можливості для експорту відновлюваної енергії з України. Схвалення закону про розвиток систем накопичення енергії та відновлення "зелених" аукціонів є позитивними кроками на шляху до розвитку сектору.

Отже, хоча війна поставила перед сектором відновлюваної енергетики України серйозні виклики, є позитивні ознаки стійкості та визнання важливості сектору у післявоєнній відбудові країни.

1.2 Основні складові, що впливають на сонячну генерацію

Температура поверхні Сонця становить приблизно 6000 К. Якби Сонце було ідеальним чорним тілом, воно випромінювало б спектр, що описується рівняннями чорного тіла, забезпечуючи спектральне випромінювання. Щоб обчислити спектральне випромінювання, яке мало б чорне тіло з розмірами Сонця і положенням на Землі, необхідно помножити спектральне випромінювання на тілесний кут Сонця, який спостерігається з Землі:

$$I_{e\lambda}^{BB}(T; \lambda) = I_{e\lambda}^{BB}(T; \lambda) \cdot \Omega_{Sun}, \quad (1.1)$$

де Ω_{Sun} – тілесний кут Сонця.

Тілесний кут Сонця (Ω_{Sun}) можна розрахувати за допомогою:

$$\Omega_{Sun} = \pi \cdot \left(\frac{R_{Sun}}{AU - R_{Earth}} \right)^2, \quad (1.2)$$

де $R_{Sun} = 696$ тис. км (радіус Сонця), $AU = 149.6$ млн. км (відстань від Землі до Сонця), $R_{Earth} = 6370$ км (радіус Землі).

Спектр чорного тіла зображено на рис. 1.1. За межами земної атмосфери спектр суттєво змінюється, так званий спектр AM0 (нульове проходження атмосфери), також показаний на рис. 1.1. Освітленість в AM0 становить:

$$I_e(AM0) = 1361 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2} \quad (1.3)$$

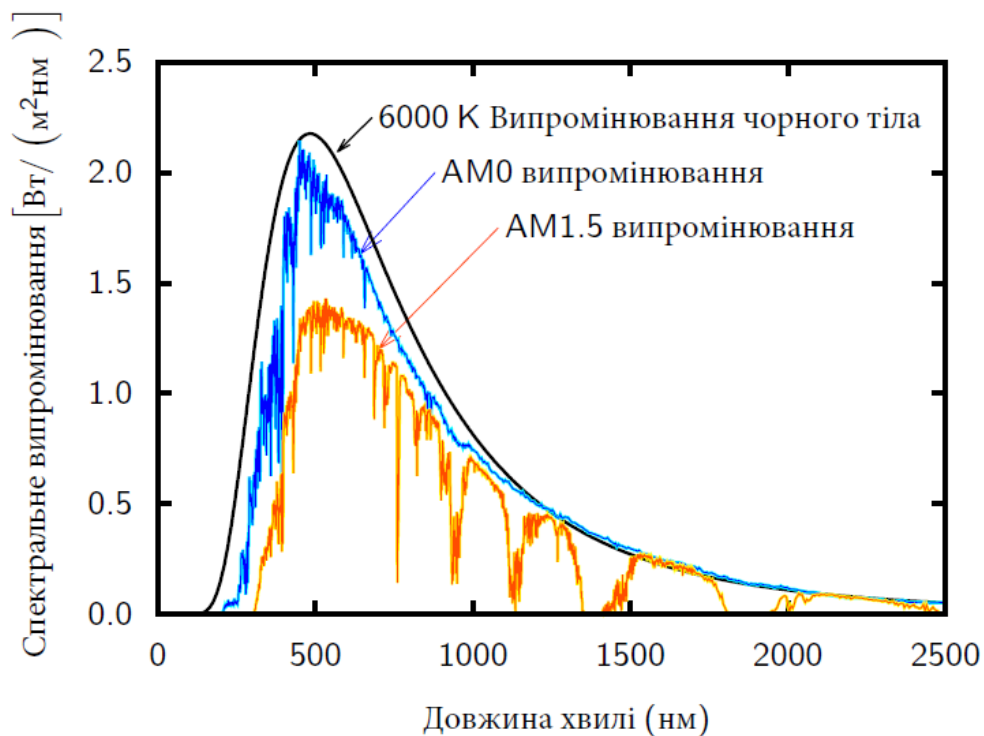


Рисунок 1.1 – Спектри випромінювання чорного тіла, AM0 та AM1.5 [6]

Коли сонячне випромінювання проходить крізь атмосферу Землі, воно зазнає ослаблення. Критичним параметром, що визначає сонячну освітленість в умовах ясного неба, є відстань, яку сонячне світло проходить через атмосферу. Ця відстань найкоротша, коли Сонце знаходиться прямо над головою, в зеніті. Відношення фактичної довжини шляху до цієї мінімальної відстані називається оптичною масою повітря. Коли Сонце знаходиться в зеніті, оптична маса повітря дорівнює одиниці, а спектр називається спектром повітряної маси 1 (AM1). Для кутів Сонця (q), віддалених від зеніту, повітряна маса (AM) визначається за формулою:

$$AM = \frac{1}{\cos q}, \quad (1.4)$$

де q – кут між Сонцем та зенітом.

Наприклад, при куті Сонця 60° (30° над горизонтом) ми отримуємо спектр AM2.

Наземне сонячне випромінювання змінюється за інтенсивністю та спектральним розподілом залежно від розташування Землі та положення Сонця. Послаблення сонячного випромінювання пояснюється розсіюванням і

поглинанням молекулами повітря, частинками пилу та/або аерозолями в атмосфері, зокрема водяною парою (H₂O), киснем (O₂) і вуглекислим газом (CO₂). Селективне поглинання призводить до появи спектральних розривів, як показано на рис. 1.1. Озон поглинає випромінювання з довжиною хвилі нижче 300 нм, і виснаження озону дозволяє більш шкідливому ультрафіолетовому випромінюванню досягати Землі. Молекули CO₂ сприяють поглинанню випромінювання вище 1 мкм, що впливає на інфрачервоний спектр і має наслідки для клімату [6].

Складові сонячної радіації поблизу земної поверхні

Складові сонячної радіації розраховуються за допомогою кутів положення Сонця відносно Земної поверхні, що зображено на рис. 1.2 – 1.4.

Сонячна радіація на нахилену поверхню через горизонтальну СР:

$$I_{Bt} = I_B \cdot R_B, \quad (1.5)$$

де $R_B = \frac{I_{Bt}}{I_B} = \frac{\cos\theta}{\cos\Phi}$ – коефіцієнт транспозиції.

Пряма СР – випромінювання, яке надходить від сонця без змін напрямку.

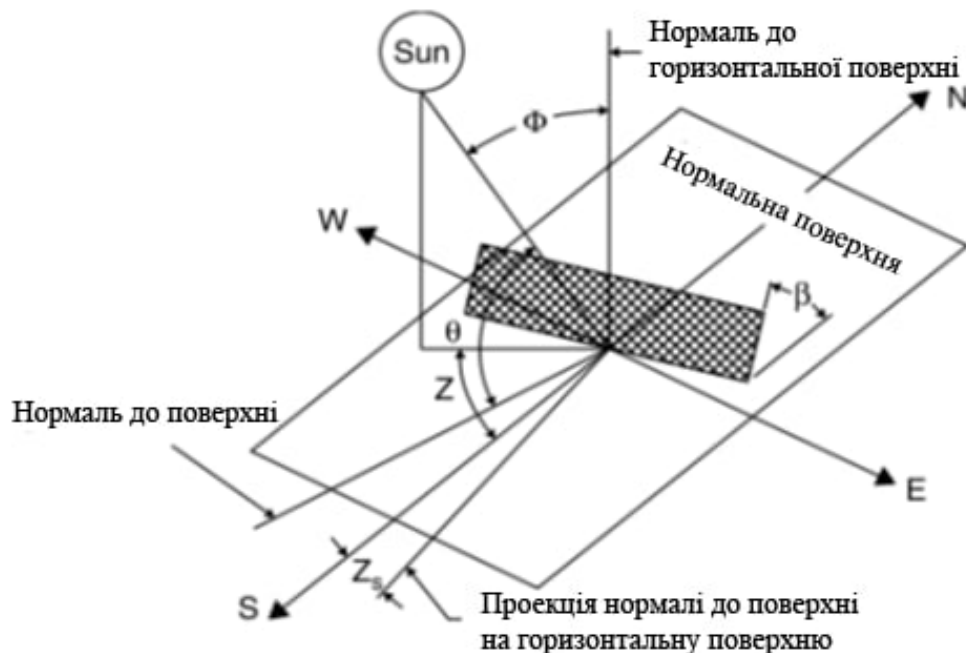


Рисунок 1.2 – Розташування нахиленої поверхні відносно Сонця [7]

Повна інтенсивність СР на нормальну поверхню, Вт/м²:

$$I_n = I_{Bn} + I_{Dn} + I_{Rn} \quad (1.6)$$

Повна інтенсивність СР на нахилену поверхню, Вт/м²:

$$I_n = I_{Bt} + I_{Dt} + I_{Rt} \quad (1.7)$$

Пряма СР на нахилену поверхню через нормальну СР:

$$I_{Bt} = I_{Bn} \cdot \cos\Theta \quad (1.8)$$

Пряма СР на горизонтальну поверхню через нормальну СР:

$$I_{Bt} = I_{Bn} \cdot \cos\Phi \quad (1.9)$$

Дифузна СР – радіація, яка надходить від Сонця після зміни напрямку променів внаслідок відбивання і розсіювання атмосферою.

Дифузна СР на похилену поверхню через дифузну радіацію на горизонтальну поверхню:

$$I_{Dt} = I_D \cdot F_{ss}, \quad (1.10)$$

де $F_{ss} = \frac{1}{2}(1 + \cos\beta)$ - кутовий фактор для дифузної радіації.

Більшу частину сонячного випромінювання відбивають хмари, меншу – сніг і лід. Густина залишкового потоку сонячного випромінювання складає приблизно 1 кВт/м².

Відбита СР на нахилену поверхню від землі та попереду розташованих об'єктів:

$$I_{Rt} = (I_B + I_D) \cdot \rho_g \cdot F_{sg}, \quad (1.11)$$

де $\rho_g = 0.1 - 0.7$ – альбедо (коефіцієнт відбиття), $F_{sg} = \frac{1}{2}(1 - \cos\beta)$ – кутовий фактор для відбитої радіації.

Сонячний час, сонячні кути

Кут схилення - кут між напрямком на сонце та екваторіальною площиною (додатна величина в літні місяці і від'ємна в зимові).

$$\delta = \delta_0 \cdot \sin\left(\frac{360}{365}(284 + N)\right), \quad (1.12)$$

де $\delta_0 = 23.45^\circ$ - максимальне схилення.

Справжній сонячний час TST – реальний час руху Сонця по небосхилу.

Місцевий стандартний час LST – час, який відраховується від стандартного меридіану SL.

$$TST = LST + \frac{LL - SL}{15} + \frac{ET}{60} - DS, \quad (1.13)$$

де LL – локальний меридіан, $ET = 9.87 \cdot \sin(2B) - 7.53 \cdot \cos(B) - 1.5 \sin(B)$ – корекція часу, обумовлена нерівномірністю швидкості обертання Землі навколо своєї осі, $B = \frac{360 \cdot (N-81)}{365}$.

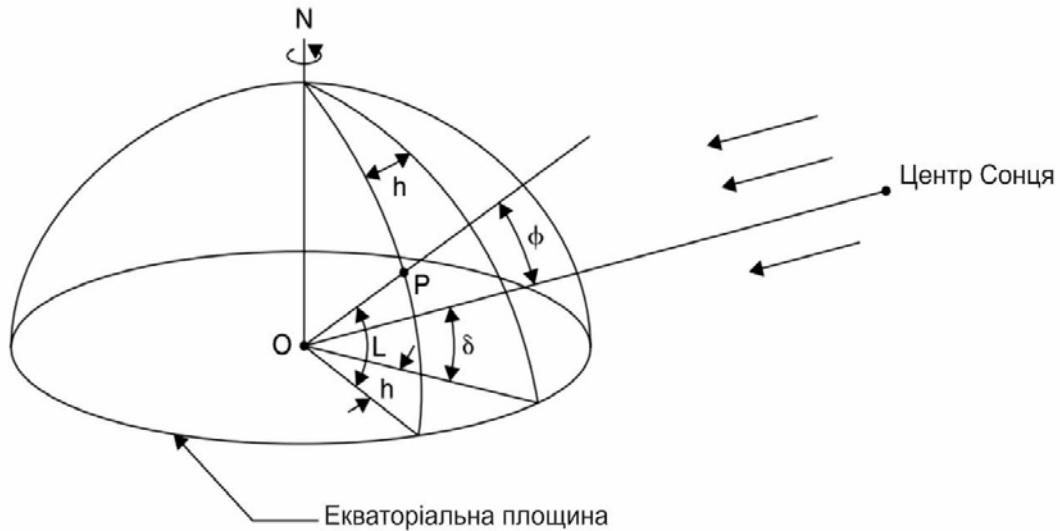


Рисунок 1.3 – Визначення широти і сонячних кутів [8]

Часовий кут h – кут між проекцією меридіана точки спостереження і проекцією напрямку центру Землі (додатне значення після півдня та від’ємне – до):

$$h = 15 \cdot (TST - 12), \text{град} \quad (1.14)$$

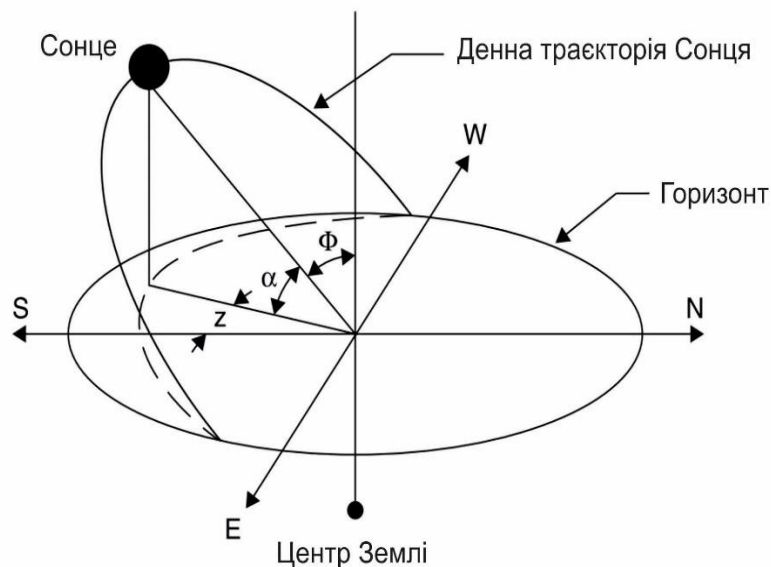


Рисунок 1.4 – Видима траєкторія Сонця від сходу до заходу [8]

Висота Сонця α – кут між сонячними променями в точку спостереження і горизонтальною площиною.

Зенітний кут Φ – кут між сонячними променями і нормаллю до горизонтальної площини.

$$\Phi + \alpha = \frac{\pi}{2} \quad (1.15)$$

$$\cos\Phi = \sin\alpha = \sin L \sin\delta + \cos L \cos\delta \cos h, \quad (1.16)$$

де L – локальна широта.

Сонячний азимутальний кут z – кут між проекцією сонячних променів на горизонтальну площину і напрямком на південь.

$$\cos z = \frac{\cos\delta \sin L \cos h - \sin\delta \cos L}{\sin\Phi} \quad (1.17)$$

Кут падіння – кут між сонячними променями та нормаллю поверхні:

$$\cos\Theta = \cos\beta \sin\alpha + \sin\beta \cos\alpha \cos(z - z_s) \quad (1.18)$$

де β – кут нахилу площини до горизонтальної поверхні, z_s – азимут проекції нормалі до площини на горизонтальну поверхню.

1.3 Останні тренди в розвитку сонячних фотомодулів

Останніми роками спостерігається сплеск інноваційних сонячних технологій, що призвело до розробки сонячних панелей нового покоління з удосконаленою конструкцією фотоелектричних (ФЕ) елементів. Ці інновації спрямовані на підвищення ефективності, мінімізацію деградації та підвищення загальної надійності. З'явилися різні технології, і виробники пропонують цілий ряд сонячних панелей з різними характеристиками. Ось огляд деяких провідних технологій фотоелектричних елементів

HJT - гетероперехідні елементи

Гетероперехідні елементи поєднують кристалічний кремній з ультратонкими плівковими шарами аморфного кремнію з обох боків. Така гетероперехідна конструкція зменшує рекомбінаційні втрати на P-N переході, мінімізуючи витік електронів і підвищуючи ефективність комірки. Яскравими прикладами є серія HIT від Panasonic та серія Alpha від REC Group, в якій

використовуються напіврозрізані HJT-елементи та 16 мікрокомірок, що забезпечує ефективність панелей, яка сягає 22,1%.

TOPCon - тунельний оксидний пасивний контакт

TOPCon - це вдосконалена архітектура кремнієвих елементів N-типу, яка зменшує рекомбінаційні втрати в сонячному елементі. Розроблена Fraunhofer ISE, вона має ультратонкий шар TOPCon, що зменшує втрати без значного збільшення виробничих витрат. Такі виробники, як Trina Solar, JA Solar та Longi Solar, використовують технологію TOPCon для досягнення ефективності панелей вище 22%.

Безпросвітні комірки - конструкція з високою щільністю комірок

Конструкція з високою щільністю комірок має на меті усунути стандартний вертикальний міжкомірковий зазор, максимізуючи площу поверхні панелі для поглинання сонячного світла. Наприклад, в комірках черепичної стрічки (TR) JinkoSolar використовується метод компресійного з'єднання, що дозволяє злегка перекривати комірки, зменшуючи міжкоміркові зазори. Це не тільки підвищує ефективність, але й мінімізує потребу в припої, роблячи панелі більш економічно вигідними та екологічно чистими.

PERC - задня комірка з пасивним емітером

Хоча колись комірки PERC були домінуючими, новіші технології перевершили їх за ефективністю. PERC-елементи використовують додаткові шари на тильній стороні для поглинання більшої кількості світлових фотонів, що підвищує загальну квантову ефективність. Різні варіації PERC, такі як місцеві Al-BSF, PERT і PERL, були розроблені для підвищення продуктивності. Однак виробники все частіше використовують більш ефективні елементи N-типу TOPcon і IBC.

Мультишини - мультистрічкові та мікродротяні шини

Мультишини, в тому числі мікродротові шини, прийшли на зміну традиційним стрічковим шинам. Ці більш тонкі, багаторазові шини покращують передачу струму і взаємозв'язок, підвищуючи загальну ефективність сонячної панелі. Технологія Cello від LG, яка використовує

круглі мікродротяні шини в лінійці Neon 2, є прикладом того, як зменшується електричний опір і підвищується ефективність.

Розділені комірки - напіврозрізані та 1/3 розрізані комірки

Розділені комірки, розрізані наполовину або на 1/3, зменшують резистивні втрати в шинах. Квадратні елементи розрізаються лазером, і в результаті верхня і нижня групи елементів працюють паралельно, підвищуючи ефективність. Великі 210-міліметрові елементи Trina Solar, розрізані на три секції (розрізані на 1/3), дозволяють виробляти панелі потужністю до 600 Вт.

Черепичні стільники:

У черепичних комірках використовуються тонкі смужки комірок, що перекривають одна одну горизонтально або вертикально по всій панелі. Завдяки лазерному різанню повнорозмірних комірок на смужки і укладанню їх у вигляді черепиці, затінення від з'єднань шин на передній стороні зводиться до мінімуму. Серія Eclipse від Seraphim та серія P від SunPower використовують технологію черепичних комірок, забезпечуючи економічно ефективні та високопродуктивні варіанти, особливо в умовах часткового затінення.

Висока щільність комірок

Щоб ще більше підвищити ефективність панелі, виробники прагнуть усунути вертикальний міжкомірковий зазор. Елементи черепичної стрічки (TR) JinkoSolar, також відомі як елементи TR, злегка перекривають один одного, використовуючи метод компресійного з'єднання для мінімізації або усунення міжелементного зазору. Така конструкція зменшує кількість необхідного припою, роблячи панелі більш економічно вигідними та екологічно чистими.

Технологія комірок IBC

Осередки з міжрозрядним тильним контактом (IBC) інтегрують сітку з 30 або більше провідників на задній стороні осередку, що дозволяє уникнути затінення, спричиненого шинами, розташованими на передній стороні. Комірки IBC, такі як Maxeon від SunPower, не тільки забезпечують вищу ефективність, але й підвищену довговічність. Задні шари підсилюють всю

комірку, запобігаючи утворенню мікротріщин і підвищуючи загальну міцність.

Технологія сонячних елементів N-типу

У той час як елементи Р-типу домінують на ринку завдяки економічній ефективності, монокристалічні елементи N-типу привертають увагу завдяки своїй ефективності та надійності. Очікується, що в міру зниження виробничих витрат, комірки N-типу стануть більш популярними. На сьогоднішній день елементи HJT і TOPCon є одними з найефективніших, і Panasonic, REC та інші компанії використовують ці технології у своїх новітніх панелях [14].

Ці технології в сукупності сприяють підвищенню ефективності, довговічності та продуктивності сонячних панелей за різних умов. Оскільки сонячна енергетика продовжує розвиватися, постійні дослідження і розробки, ймовірно, приведуть до подальших інновацій.

Тонкоплівкові сонячні панелі є альтернативою традиційним сонячним панелям з кристалічного кремнію. Вони називаються "тонкоплівковими", оскільки використовують дуже тонкі шари напівпровідникових матеріалів для генерації електроенергії. Найпоширеніші типи тонкоплівкових сонячних елементів включають аморфний кремній (a-Si), телурид кадмію (CdTe) і селенід міді індію галію (CIGS) [15].

Перовскітні сонячні елементи - це тип тонкоплівкових сонячних елементів, який привернув до себе значну увагу завдяки швидкому прогресу в підвищенні ефективності. Вони використовують сполуку, відому як перовскіт, як правило, гібридний органічно-неорганічний матеріал на основі свинцю або галогеніду олова.

Два ключові графіки підкреслюють важливість перовскітних сонячних елементів. Перший, рис. 1.5, ілюструє стрімке зростання їхньої ефективності порівняно з іншими фотоелектричними технологіями, досягаючи і перевершуючи традиційну тонкоплівкову фотоелектрику протягом короткого періоду часу. Другий графік, рис. 1.6, демонструє вражаюче використання

енергії фотонів перовскітами, що наближається до значень, порівнянних з найсучаснішими технологіями, але при значно менших витратах.

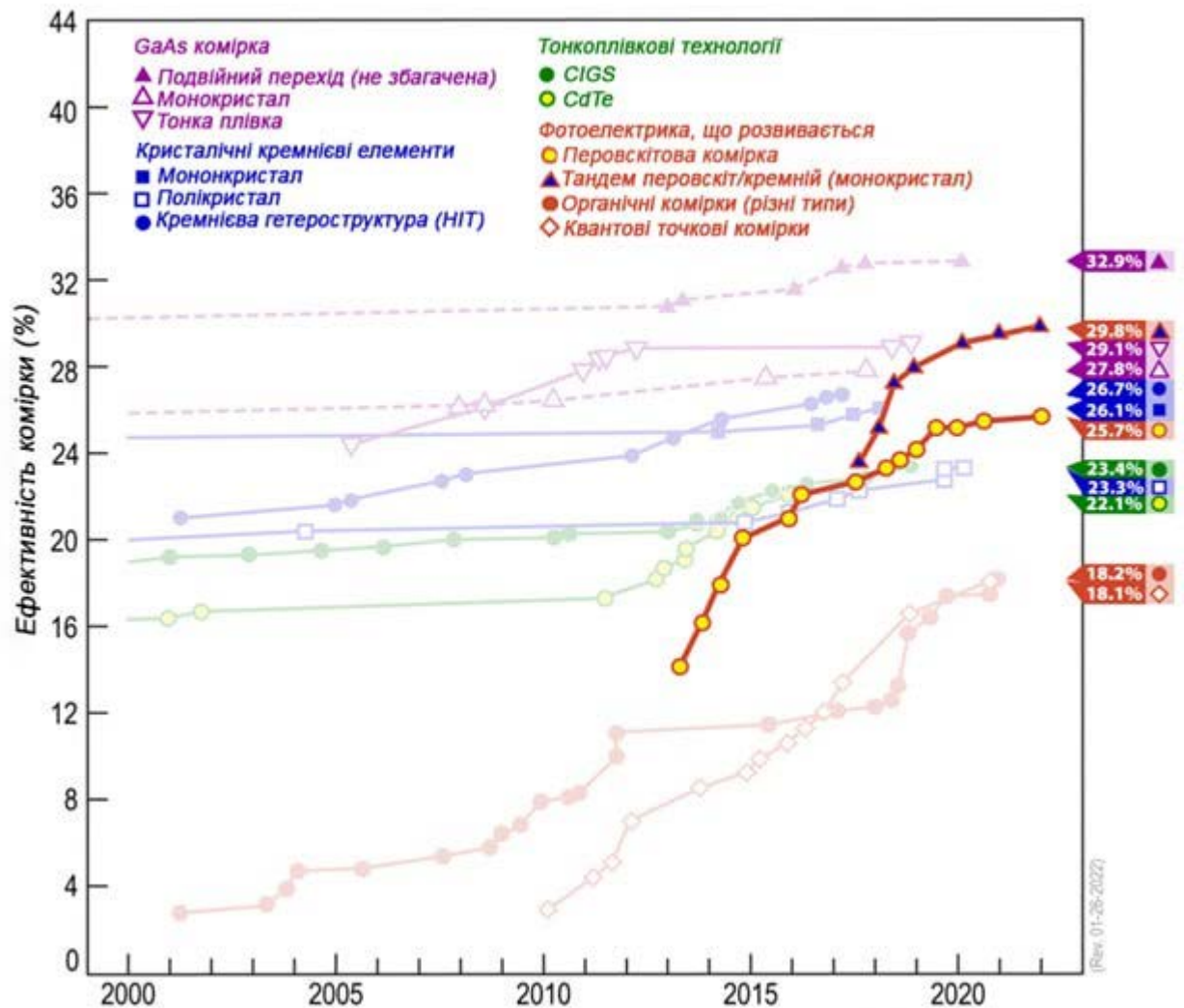


Рисунок 1.5 - Рекорди ефективності для перовскітних фотоелементів порівняно з іншими фотоелектричними технологіями в лабораторних умовах [16]

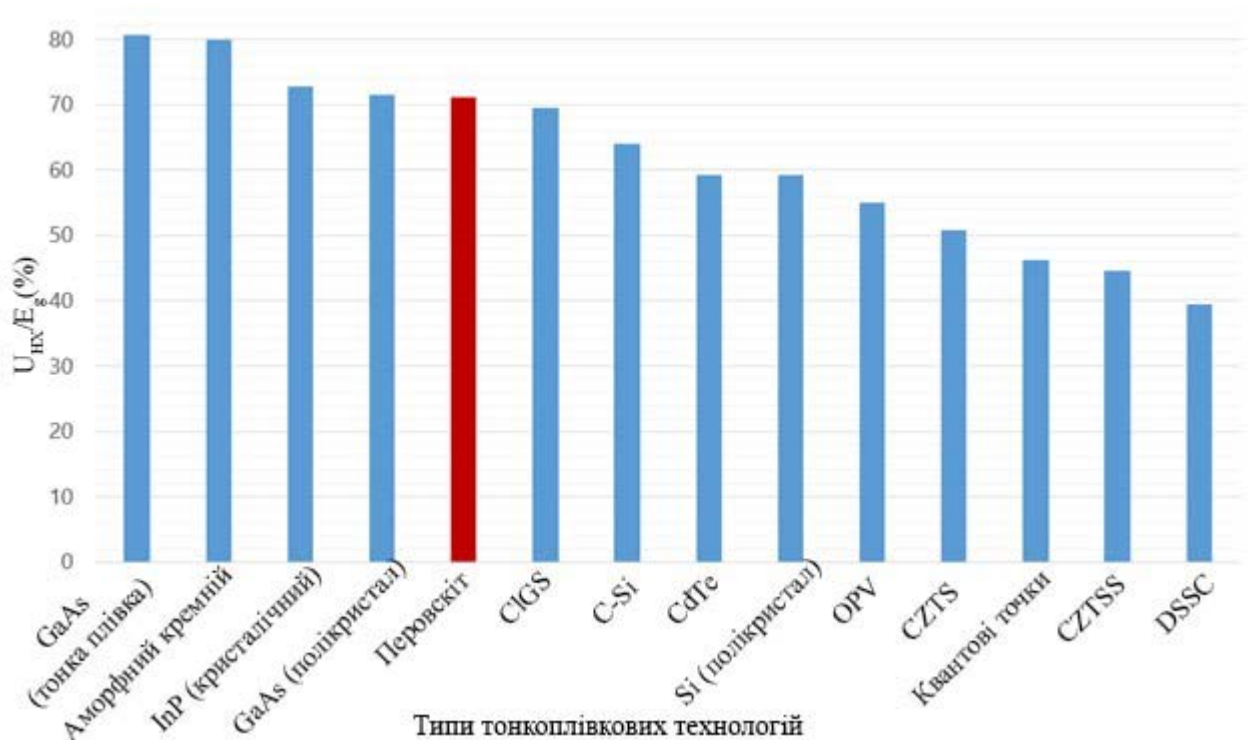


Рисунок 1.6 - Максимальне використання енергії фотонів для поширених одноперехідних систем матеріалів сонячних елементів [16]

Незважаючи на швидке підвищення ефективності, перовскітні сонячні елементи стикаються з проблемами, в основному пов'язаними зі стабільністю і токсичністю:

Стабільність: довгострокова стабільність залишається проблемою через шляхи деградації під впливом зовнішніх факторів (вода, світло, кисень) та внутрішню нестабільність.

Токсичність: присутність свинцю в перовскітах викликає занепокоєння з точки зору екології, що спонукає до пошуку менш токсичних альтернатив.

Гістерезис: гістерезис між струмом і напругою, зумовлений міграцією та рекомбінацією іонів, є ще однією проблемою, що впливає на продуктивність.

Зусилля, спрямовані на підвищення стабільності, включають змішані катіонні системи, пасивацію поверхні та комбінування 2D і 3D перовскітів. Інкапсуляція і кращі міжфазні шари сприяють підвищенню стабільності, а нещодавні досягнення показали, що комірки здатні витримувати 1000-годинний тест на вологе нагрівання.

Перовскітні сонячні елементи можуть бути інтегровані в стандартні архітектури, такі як органічна фотоелектрика. Якість, товщина та умови осадження плівки мають вирішальне значення. Використовуються вакуумні та розчинні методи, причому вдосконалення обробки розчинів призводить до однакової ефективності з елементами, осадженими у вакуумі.

Майбутні дослідження спрямовані на зменшення рекомбінації, підвищення ефективності за допомогою 2D перовскітів та оптимізацію інтерфейсних матеріалів. Шари для вилучення заряду можуть переходити від органічних до неорганічних для кращої стабільності. ТанDEMні елементи c-Si/перовскіт показали багатообіцяючі результати, з ефективністю, що перевищує 25%. Окрім сонячної енергетики, перовскіти мають потенціал для застосування у світлодіодах та резистивній пам'яті [16].

1.4 Силкові електронні перетворювачі у фотоелектричних системах

Силкові електронні перетворювачі відіграють ключову роль у фотоелектричних (ФЕ) системах, метою яких є вилучення максимальної потужності з фотоелектричних панелей і ефективна передача її в навантаження або мережу. Ідеальний фотоелектричний перетворювач повинен досягати цього, мінімізуючи вміст гармонік, підтримуючи коефіцієнт потужності, близький до одиниці, і регулюючи вихідну напругу, особливо в автономних системах.

Архітектура фотоелектричної системи визначає взаємозв'язок фотоелектричних модулів і створення інтерфейсу з мережею. На вибір архітектури системи впливають різні фактори, такі як навколишнє середовище станції, масштабованість і міркування вартості. Різні архітектури, рис. 1.7, включають централізовану, стрінгову та модульну конфігурації силової електроніки.

Сонячні інвертори, найважливіший компонент фотоелектричних систем, повинні мати певні характеристики, щоб забезпечити оптимальну продуктивність і відповідність нормативним вимогам:

Висока ефективність: максимізація передачі енергії в мережу або навантаження має вирішальне значення для власника системи.

Функції безпеки: можливість виявлення активного замикання та дотримання різниці потенціалів між сонячним генератором і землею.

Обмеження гармонік: дотримання низьких граничних значень гармонік в мережевих струмах, що регулюються законодавством більшості країн.

Норми електромагнітної сумісності: дотримання норм електромагнітних завад (EMI) для мінімізації небажаного впливу на розташоване поруч обладнання.

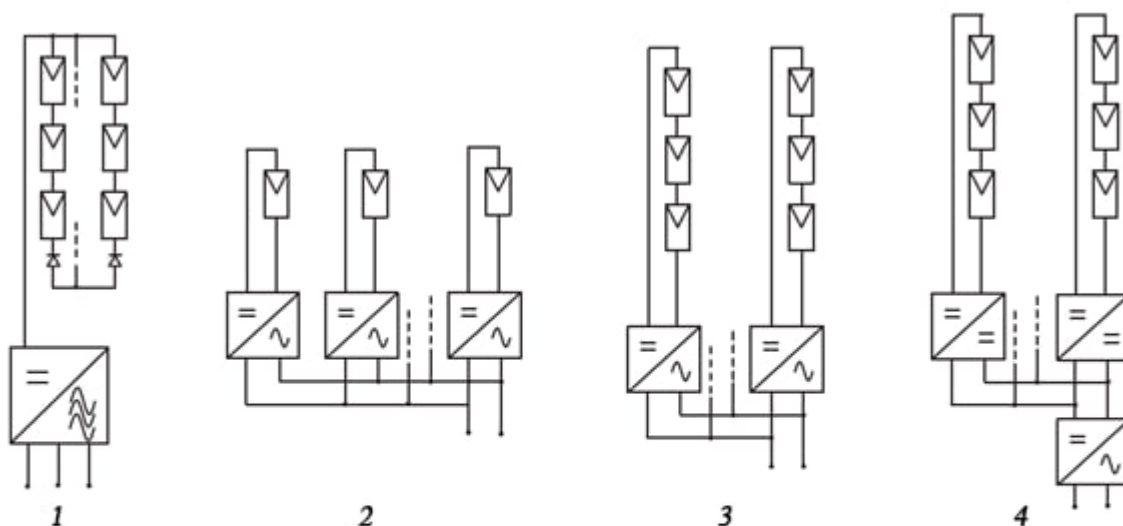
Характеристики навколишнього середовища: вимоги до зовнішньої установки, включаючи умови температури і вологості (наприклад, IP 54).

Довговічність: розрахований на 20 років експлуатації в суворих умовах навколишнього середовища.

Безшумна робота: відсутність чутного шуму, що відповідає екологічним стандартам.

Фотоелектричні системи використовують однофазні або трифазні інвертори в залежності від вимог до потужності. Однофазні інвертори зазвичай використовуються в невеликих домашніх фотоелектричних системах, що підключаються до однієї фази електромережі. Трифазні інвертори використовуються для більших потужностей, підключаючись до всіх фаз мережі, щоб уникнути несиметричних струмів і пов'язаних з ними проблем з мережею.

Термін "інвертор" використовується для позначення двох різних пристроїв. По-перше, він позначає електронний інвертор, що виконує перетворення постійного струму в змінний. По-друге, це загальний блок, що випускається виробниками, який включає в себе трекер MPP, перетворювач постійного струму, перетворювач постійного струму в змінний струм і, можливо, контролер заряду або з'єднання з акумулятором.



1. - Архітектура ФЕС з використанням центрального інвертора;
2. - Архітектура ФЕС з використанням модульних інверторів;
3. - Архітектура ФЕС з використанням стрінгових інверторів;
4. - Архітектура ФЕС з використанням багатострінгового інвертора.

Рисунок 1.7 - Різні системні архітектури, що використовуються у фотоелектричних системах [6]

Центральні інвертори

Центральні інвертори представляють просту архітектуру, яка зазвичай використовується у великих фотоелектричних системах. Базова схема передбачає з'єднання фотоелектричних модулів в стрінги, що призводить до підвищення напруги в системі. Потім кілька стрінгів з'єднуються паралельно, утворюючи фотоелектричний масив. Весь масив підключається до єдиного центрального інвертора, який виконує важливі функції відстеження точки максимальної потужності та перетворення енергії. У зображеній конфігурації часто використовується трифазний інвертор.

Така архітектура переважає в дуже великих фотоелектричних виробництвах, де центральний інвертор зазвичай виконує перетворення постійного струму в змінний трифазний. Простота і надійність центральних інверторів у поєднанні з їх низькою питомою вартістю (вартість на кВт встановленої потужності) роблять їх кращим вибором для таких великих сонячних електростанцій.

Незважаючи на ці переваги, центральні інвертори мають суттєві недоліки:

Проблеми з електропроводкою постійного струму. Схема системи вимагає транспортування значної кількості електроенергії на значні відстані за допомогою проводки постійного струму. Обробка постійного струму може бути складним завданням, що вимагає спеціальних заходів безпеки, таких як товстіша ізоляція кабелів постійного струму та спеціальні автоматичні вимикачі. Ці заходи безпеки можуть призвести до збільшення витрат.

Втрати від неузгодженості. Всі фотоелектричні модулі працюють в одній точці максимальної потужності. Така рівномірна робота може призвести до втрат на неузгодженість в модулях, що є суттєвим недоліком, який стає більш вираженим зі старінням і частковим затіненням. Неузгодженість між різними стрінгами може суттєво знизити загальну вихідну потужність системи.

Низька гнучкість і розширюваність. Високі номінальні характеристики системи призводять до того, що дизайн зазвичай розглядається як єдине ціле, що ускладнює його розширення або модифікацію. Відсутність гнучкості та розширюваності в дизайні системи може бути обмеженням, особливо в динамічних або мінливих сценаріях.

Втрати потужності в стрінгових діодах. Для запобігання циркуляції струму в стрінгах часто використовують стрінгові діоди. Однак ці діоди призводять до втрат потужності в системі.

Таким чином, хоча центральні інвертори користуються популярністю завдяки своїй простоті, надійності та економічній ефективності на дуже великих фотоелектричних станціях, вони мають справу з проблемами, пов'язаними з безпекою електропроводки постійного струму, втратами на неузгодженість, обмеженою гнучкістю та втратами потужності в стрінгових діодах.

Модульні інвертори

Модульно-інтегровані інвертори представляють собою особливу архітектуру для фотоелектричних (ФЕ) систем, що працюють безпосередньо від одного або декількох ФЕ-модулів потужністю, як правило, в діапазоні декількох сотень ват. На відміну від центральних інверторів, ці інвертори інтегровані в фотоелектричні панелі, які часто називають "фотоелектричними панелями змінного струму", що дозволяє легко будувати і розширювати систему з низькими інвестиційними витратами за принципом "підключи і працюй".

Ключові особливості модульних інверторів:

Двоступеневе перетворення енергії. Через низьку номінальну напругу фотоелектричних модулів, модульні інвертори часто вимагають двоступеневого перетворення енергії. На першому етапі напруга постійного струму підвищується до необхідного рівня, а на другому етапі вона інвертується в змінний струм. Цей процес іноді полегшується за допомогою високочастотного трансформатора, який забезпечує повну гальванічну розв'язку, підвищуючи гнучкість системи.

Гнучкість і розширюваність. Інтеграція з фотоелектричними панелями забезпечує найвищу гнучкість і розширюваність системи. Принцип "підключи і працюй" дозволяє побудувати повну і легко розширювану фотоелектричну систему, що робить її придатною для різних застосувань.

Переваги в мінімізації втрат на неузгодженість: Модульно-інтегровані інвертори допомагають мінімізувати втрати на неузгодженість, які можуть виникнути через неоптимальне відстеження точки максимальної потужності (MPPT). Ця функція сприяє максимізації загальної вихідної потужності системи.

Жорсткі умови експлуатації. Оскільки ці інвертори встановлюються безпосередньо на фотоелектричні модулі, вони повинні витримувати суворі умови навколишнього середовища, включаючи високі температури і великі добові та сезонні коливання температури. Ця вимога є складною, але необхідною для їх інтеграції в структуру фотоелектричних модулів.

Вищі питомі витрати. Незважаючи на свої переваги, модульно-інтегровані інвертори, як правило, мають вищі питомі витрати в порівнянні з іншими топологіями інверторів. Ця вища вартість пов'язана зі складністю інтеграції та необхідністю забезпечення довговічності в суворих умовах навколишнього середовища.

Таким чином, модульно-інтегровані інвертори пропонують унікальний підхід до фотоелектричних систем, інтегруючись безпосередньо з фотоелектричними панелями для забезпечення гнучкості, розширюваності та мінімізації втрат від неузгодженості. Однак ці переваги супроводжуються такими проблемами, як робота в суворих умовах і вищі питомі витрати. Для оптимізації продуктивності та задоволення конкретних потреб були запропоновані та впроваджені різні топології.

Стрінгові інвертори

Стрінгові інвертори являють собою гібридну архітектуру фотоелектричних систем, що поєднує в собі переваги як центральних, так і модульно-інтегрованих інверторів. У цій конфігурації кілька фотоелектричних модулів з'єднуються послідовно, створюючи фотоелектричну мережу, як правило, з номінальною потужністю до 5 кВт і напругою холостого ходу до 1 кВ. Потім фотоелектрична система підключається до мережі за допомогою декількох менших інверторів.

Гібридна концепція. Стрінгові інвертори поєднують в собі переваги центральних інверторів (підходять для великомасштабного фотоелектричного виробництва) та інтегрованих в модулі інверторів (пропонують гнучкість і можливість розширення).

Напруга постійного струму. Подібно до центральних інверторів, стрінгові інвертори працюють з високою напругою постійного струму. Цей аспект є особливо важливим, оскільки стрінгові інвертори зазвичай встановлюються в житлових або комерційних приміщеннях, де можуть бути відсутні спеціальні опорні конструкції або підвищені вимоги до безпеки. Для

правильного з'єднання між модулями та інверторами зазвичай потрібні кваліфіковані електрики.

Труднощі встановлення. Встановлення стрінгових інверторів у різних умовах, наприклад, у домогосподарствах або офісних будівлях, вимагає особливої уваги до кабелів постійного струму та захисту системи. Стрінгові інвертори можуть потребувати додаткових заходів безпеки через їхню близькість до житлових приміщень.

Вплив часткового затінення: Хоча часткове затінення може впливати на загальну ефективність системи, кожна стрінгова лінія в установці з інвертором працює незалежно в точці максимальної потужності. Ця функція допомагає пом'якшити вплив затінення, дозволяючи незачепленим стрінгам працювати оптимально.

Усунення послідовних діодів. На відміну від фотоелектричних масивів з великою кількістю паралельних фотомодулів, стрінгові інвертори не потребують послідовних діодів. Це зменшує втрати, пов'язані з діодами, і спрощує конструкцію системи.

Ризик виникнення "гарячих точок". Одним з потенційних недоліків стрінгових інверторів є ризик виникнення "гарячих точок" всередині стрінгів. Нерівномірний розподіл струму і потужності всередині стрінгу може призвести до локального перегріву. Моніторинг та управління на рівні стрінгів мають вирішальне значення для своєчасного виявлення та усунення таких проблем.

Багатострінгові інвертори

Концепція багатострінгового інвертора, має на меті використовувати переваги як лінійної, так і центральної архітектури інвертора. Цей підхід, розроблений для поєднання більш високого виходу енергії стрінгового інвертора з економічною ефективністю центрального інвертора, передбачає підключення малопотужних DC-DC перетворювачів до окремих фотоелектричних модулів. Кожен стрінг оснащений власною точкою відстеження максимальної потужності (MPP), що дозволяє незалежно

оптимізувати вихід енергії. Розширення системи в межах певного діапазону потужностей спрощується додаванням нової лінії з DC-DC перетворювачем. Всі DC-DC перетворювачі з'єднані між собою шиною постійного струму через центральний інвертор, що полегшує підключення до мережі.

На додаток до концепції багатострінгових інверторів, згадується концепція командної роботи - альтернативний підхід, який поєднує технологію стрінгових інверторів з концепцією "головний-другорядний", рис. 1.8. У цьому сценарії кілька стрінгових інверторів співпрацюють між собою. Під час дуже низького рівня сонячного випромінювання весь фотоелектричний масив підключається до одного інвертора, щоб мінімізувати загальні втрати, використовуючи високу ефективність силових електронних перетворювачів при повному навантаженні. Зі збільшенням сонячного випромінювання підключають більше інверторів, розбиваючи фотоелектричний масив на менші блоки, доки кожен інвертор фотоелектричної панелі не буде працювати на потужності, близькій до номінальної. Цей режим дозволяє кожному стрінгу працювати незалежно з власним MPP-трекером. При низькому рівні сонячного випромінювання інвертори керуються за принципом "головний-другорядний".

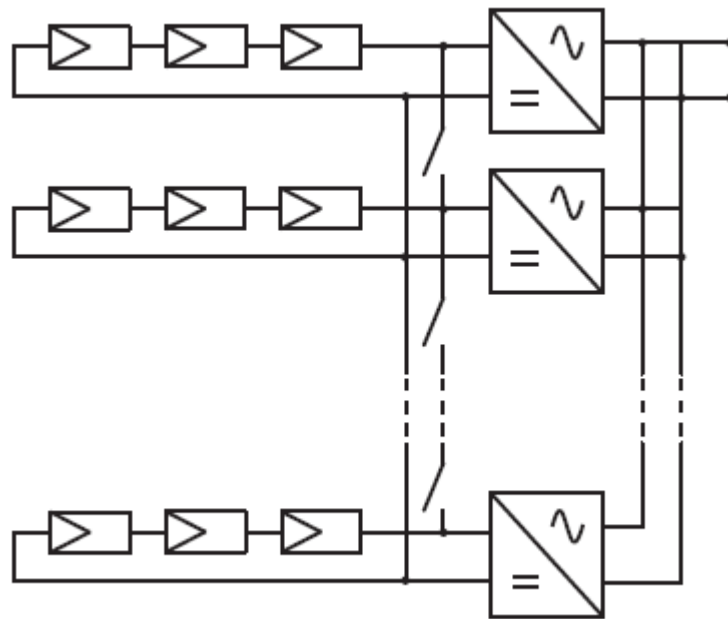


Рисунок 1.8 – Командне підключення інверторів в концепції «головний-другорядний» [6]

Таким чином, концепція багатострінгових інверторів пропонує збалансований підхід, поєднуючи переваги виходу енергії, властиві стрінговим інверторам, з економічною ефективністю центральних інверторів. Командна концепція, хоча і менш поширена, запроваджує стратегію спільної роботи з декількома стрінговими інверторами, оптимізуючи ефективність за різних умов сонячної активності. Обидві концепції вносять свій внесок у різноманітний ландшафт архітектур фотоелектричних систем, кожна з яких має свої сильні сторони та сфери застосування.

DC-DC перетворювачі

Досягнення в галузі силової електроніки, особливо у відновлюваній енергетиці, суттєво трансформували технології силових перетворювачів. DC-DC перетворювачі поділяються на неізольовані та ізольовані типи.

В контексті DC-DC перетворювачів, "ізольований тип" передбачає електричний бар'єр між входною та вихідною сторонами, реалізований за допомогою високочастотних трансформаторів. Однак така ізоляція створює певні проблеми, оскільки розмір бар'єру відносно перетворювача стає громіздким, що призводить до значних втрат потужності. Для усунення цих

недоліків набув популярності варіант "неізовованого перетворювача", що дозволяє обійти складнощі, пов'язані з ізовованими типами. Цей відхід від ізовованих конфігурацій став стандартною практикою в останні роки.

Різні типи DC-DC перетворювачів задовольняють різні вимоги до рівня перетворення напруги у фотоелектричних системах. До них відносяться знижувальний перетворювач, підвищувальний перетворювач, підвищувально-знижувальний перетворювач, перетворювач Чука та односторонній перетворювач первинної індуктивності (SEPIC). Вибір між цими перетворювачами залежить від конкретних потреб застосування, рис. 1.9.

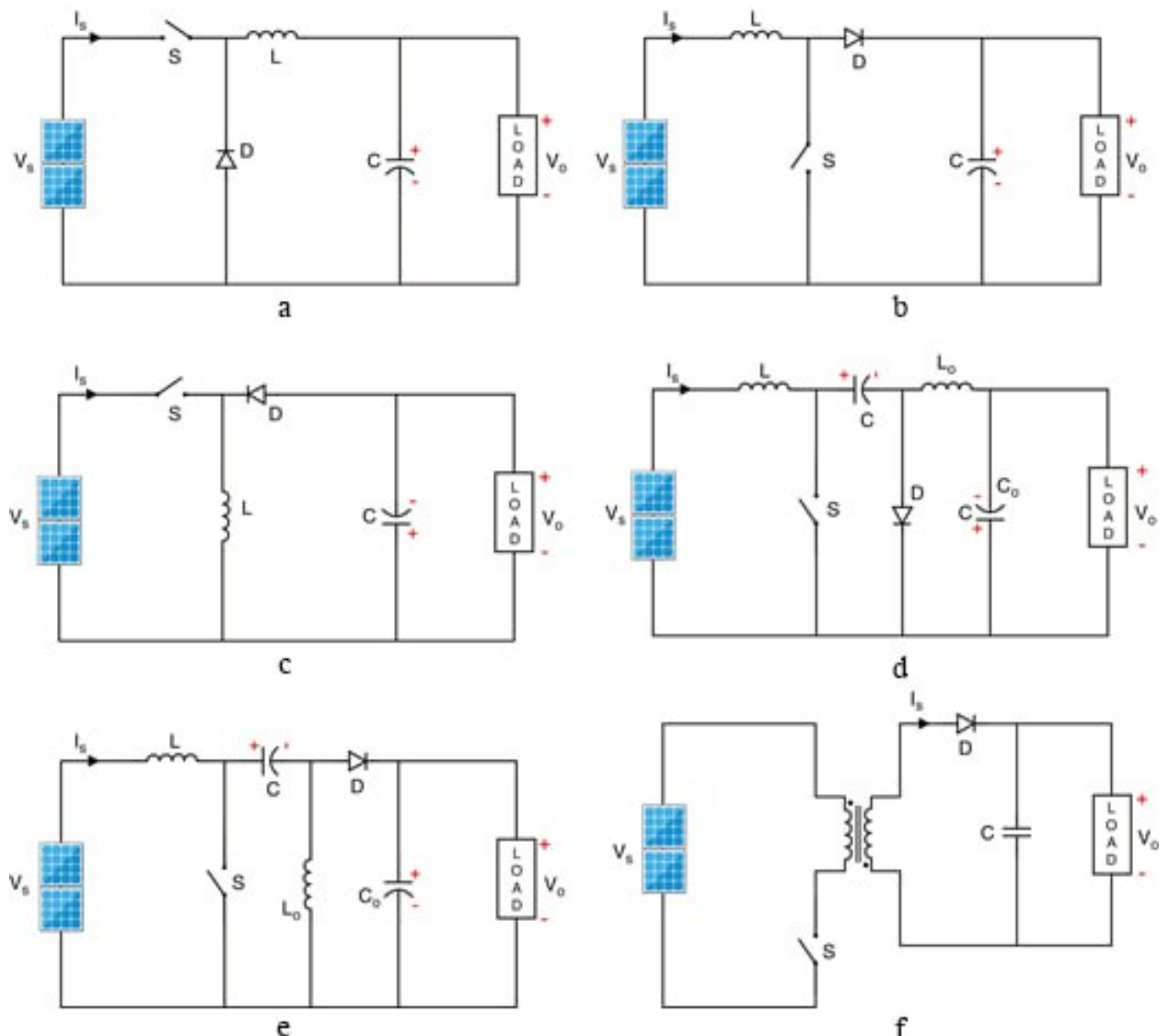


Рисунок 1.9 - Топологія схеми DC-DC перетворювачів для фотоелектричних систем: а - знижувальний перетворювач, б - підвищувальний перетворювач,

c - підвищувально-знижуючий перетворювач, d - перетворювач Чука, e - SEPIC-перетворювач, f - зворотний перетворювач [17]

Знижувальний перетворювач

Перетворювач напруги є ключовим компонентом імпульсних джерел живлення, що забезпечує вихідну напругу (V_{out}), нижчу за вхідну (V_{in}), тим самим зменшуючи напругу постійного струму. Його фундаментальна структура включає комутаційний пристрій (S), діод (D), котушку індуктивності (L) і конденсатор (C). Рівняння визначає вихідну напругу на основі робочого циклу комутаційного пристрою (D_t):

$$D_t = \frac{V_{out}}{V_{in}} \quad (1.19)$$

Джерела вхідної напруги можуть бути різними - від акумуляторів і випрямлячів змінного струму до відновлюваних джерел енергії, таких як фотоелектричні системи або паливні елементи, що робить його універсальним для різних застосувань. Вихідний сигнал перетворювача знаходить застосування в пристроях з низьким рівнем напруги, таких як системи керування акумуляторами та зарядні пристрої для сонячних батарей.

Перетворювач зазвичай працює в двох режимах: режим безперервної провідності (CCM) і режим переривчастої провідності (DCM). У режимі безперервної провідності струм через індуктор ніколи не досягає нуля, оскільки він залишається більшим за нуль протягом всієї роботи. І навпаки, в DCM струм через котушку індуктивності припиняється незабаром після завершення періоду комутації.

Підвищуючий перетворювач

Підсилювальний перетворювач складається з таких основних компонентів, як котушка індуктивності (L), діод (D), комутаційний пристрій (S) і конденсатор (C). Ця топологія призначена для підвищення вихідної напруги (V_{out}) до рівня, що перевищує вхідну напругу (V_{in}). Вона слугує ефективним інтерфейсом для різних застосувань, долаючи розрив між фотоелектричним масивом, високою вхідною напругою акумуляторної батареї

та різноманітними навантаженнями постійного струму. Це робить підвищувальний перетворювач особливо придатним для застосування у відновлюваних джерелах енергії, де низька напруга є поширеним явищем і традиційні рішення можуть бути недостатніми.

Робочий цикл підвищувального перетворювача, що визначає час увімкнення комутаційного пристрою, розраховується за допомогою рівняння:

$$D_t = \frac{V_{out} - V_{in}}{V_{out}} \quad (1.20)$$

Підвищувальний перетворювач зазвичай працює в двох режимах: режим безперервної провідності (CCM) і режим переривчастої провідності (DCM). Поточні дослідження вивчають альтернативні режими роботи для підвищення продуктивності системи. Нещодавні досягнення в області підвищувальних перетворювачів, що застосовуються в системах збору сонячної енергії, були зосереджені на управлінні якістю електроенергії. Це включає в себе вирішення таких проблем, як гармоніки, регулювання нульової напруги, балансування навантаження і корекція коефіцієнта потужності (PFC).

Підвищувально-знижувальний перетворювач

Бак-буст перетворювач має схожу топологічну схему з буст-перетворювачем. Основна відмінність між ними полягає в розміщенні комутаційного пристрою. Цей перетворювач поєднує в собі фундаментальні структури як підвищувального, так і понижувального перетворювачів, тому його називають підвищувально-знижувальним перетворювачем. Його універсальність дозволяє як підвищувати, так і знижувати вхідну напругу.

У практичному застосуванні підвищувально-знижувальний перетворювач зазвичай використовується для зв'язування напруги фотоелектричної батареї з напругою навантаження постійного струму або з напругою акумулятора. Вихідна напруга визначається зміною робочого циклу, який диктує, в якому режимі працює перетворювач - підвищувальному чи знижувальному. Зокрема, коли робочий цикл нижче 50%, перетворювач працює в режимі підвищення, що призводить до того, що вихідна напруга

менша за вхідну. І навпаки, якщо робочий цикл перевищує 50%, перетворювач працює в режимі підвищення, в результаті чого вихідна напруга перевищує вхідну.

Для розрахунку вихідної напруги бак-буст перетворювача використовується рівняння:

$$V_{out} = -V_{in} \left(\frac{D_t}{1 - D_t} \right) \quad (1.21)$$

Це рівняння враховує робочий цикл (D) для визначення відповідного режиму і згодом розраховує вихідну напругу на основі вхідної напруги.

Таким чином, подвійна функціональність підвищувального перетворювача напруги робить його цінним компонентом для підключення фотоелектричних модулів до навантажень постійного струму або акумуляторів, пропонуючи гнучкість в управлінні різними вимогами до напруги [17].

РОЗДІЛ 2 СИСТЕМИ НАКОПИЧЕННЯ ЕНЕРГІЇ. ТЕХНОЛОГІЇ, ПРИНЦИПИ ЇХ РОБОТИ.

Системи накопичення енергії (СНЕ) представляють собою технології, які дозволяють зберігати та використовувати енергію за потребою. Вони використовуються для підвищення надійності та ефективності електромереж, вирівнюючи коливання в попиті та пропозиції енергії. Також СНЕ допомагають інтегрувати відновлювані джерела енергії, такі як вітер та сонце, в електромережу, зберігаючи надлишок енергії в періоди низького попиту і вивільнюючи її в періоди пікового попиту.

Системи зберігання енергії можуть призводити до інших позитивних результатів, таких як зменшення пікового попиту, покращення якості електроенергії та забезпечення резервного живлення під час перебоїв. З огляду на зростання використання відновлюваної енергії та потребу в стабільності електроенергетичних систем, системи накопичення енергії стають все важливішими.

Застосування засобів накопичення енергії і їх позитивні впливи можуть бути класифіковані на основі різних характеристик, таких як тривалість використання та обсяг накопиченої енергії. Невеликі системи з коротким часом розряду можуть використовуватися для зниження коливань напруги та частоти, що зазвичай пов'язані з перехідними процесами різного роду.

Системи з тривалим часом розряду можуть бути корисними для споживачів, які мають великий та нерівномірний попит на електроенергію. Вони дозволяють переміщати частину споживання з пікових годин, коли енергія коштує дорого, на позапікові години, коли енергія є дешевшою. У випадку систем з великою потужністю, можуть бути розглянуті варіанти продажу накопиченої енергії на енергоринку, зокрема, в якості регулюючого резерву.

Акумуляторні батареї. В простому вигляді, подібні до акумуляторів, які живлять мобільні пристрої, такі як телефони і ноутбуки. У контексті електроенергетики, це є великі системи накопичення електроенергії. Існує

кілька типів батарей, які відрізняються електролітом, такими як літій-іонні, свинцево-кислотні, нікель-кадмієві та інші. Кожен тип батарей має свої характеристики, які роблять їх корисними для конкретних застосувань. У сфері електроенергетики найчастіше використовуються літій-іонні, свинцево-кислотні та інші типи батарей.

Перевагами систем накопичення енергії з використанням хімічних пристроїв є швидке встановлення, модульність конструкції, низький час переходу між режимами заряду/розряду та безпека для навколишнього середовища. Вони не мають рухомих частин, а всі перемикання відбуваються автоматично, що зменшує вплив людського фактору.

Недоліками є складна утилізація після закінчення терміну служби акумуляторних елементів, обмеженість циклів заряду/розряду та токсичність деяких типів акумуляторів, що підвищує складність експлуатації [18].

Паливні комірки. Це пристрої, які створюють електроенергію через хімічні реакції, використовуючи різні реагенти, такі як водень, метан, вугілля, інші органічні речовини, а також окиснювачі, такі як повітря, перекис водню і інші. В технології паливних комірок використовується "холодне горіння" водню. Ця технологія є дуже перспективною і може бути використана в різних галузях, від малих електронних пристроїв до великих систем накопичення електроенергії.

Переваги використання паливних комірок включають відсутність викидів, тривалий термін служби, швидкий перезаряд, і невелику залежність коефіцієнта корисної дії від завантаження.

Недоліками цієї технології є залежність від температури навколишнього середовища, потреба в зовнішньому завантаженні для перезаряду, складність зберігання водню, низька питома енергія на одиницю об'єму водню, і інертність, що вимагає додаткового резерву потужності для пікових навантажень або використання інших технічних рішень, таких як системи накопичення енергії, регулюючі автотрансформатори або суперконденсатори [19].

Проточні редокс-акумулятори. Вони представляють собою акумулятори з рідким електролітом, відомі як Flow Battery. Принцип їх роботи ґрунтується на взаємодії двох рідких "заряджених" електролітів, які прокачуються через спеціальну комірку за допомогою насосів. Електричний струм генерується в цій комірці під час взаємодії електролітів. Кожен електроліт має свій власний резервуар, і в комірці вони розділені мембраною-сепаратором, яка дозволяє іонам пересуватися, подібно до звичайного електрохімічного акумулятора. Оскільки у проточних редокс-акумуляторах ці електроліти виконують роль рідких електродів, їх часто називають "рідкими електродами".

Переваги використання проточних редокс-акумуляторів включають в себе можливість розділення електролітів, які відповідають за зберігання енергії, від пристрою, що генерує струм. Це дозволяє перезаряджати їх не лише через звичайне підключення до джерела струму, але й шляхом заміни спрацьованого електроліту на новий, що може займати всього кілька хвилин. Це дуже зручно в разі доставки модулів системи акумуляування в надзвичайних ситуаціях або використання їх в автомобілях. Іншими перевагами є надійність, довговічність (більше 10 000 циклів заряду-розряду), роздільне зберігання активних речовин і відсутність коротких замикань та перегрівання.

Недоліки проточних редокс-акумуляторів включають складну систему порівняно зі звичайними акумуляторами, залежність від температури, низьку щільність зберігання енергії, складність виготовлення необхідних мембран та наявність рухомих частин, таких як насоси [20].

Суперконденсатори. Це вид конденсаторів, що виділяється великою ємністю. Вони зберігають енергію завдяки накопиченню статичного заряду. Існують три основних види суперконденсаторів: сухий сепаратор, електролітичний і суперконденсатор. Вони відрізняються ємністю та сферою застосування відповідно до їх виду. Наприклад, вони можуть

використовуватися як додаткова система в гібридних конфігураціях разом із електрохімічними акумуляторами.

Переваги суперконденсаторів включають: дуже швидку зарядку і розрядку, велику кількість циклів заряду/розряду, більше 30 000 годин. Великий діапазон робочих температур, велику питому потужність до 10 тисяч Вт/кг.

Недоліки цієї технології включають: невелику питому енергоємність, всього 5 Вт·год/кг, короткострокове зберігання електроенергії. Висока напруга може скоротити термін служби конденсатора, високий рівень саморозряду. Лінійний характер розряду обмежує використання всієї накопиченої енергії [21].

Гідроакумулюючі електростанції. ГАЕС є відомими об'єктами для зберігання електроенергії та працюють на принципі використання перепаду рівнів води, але вони відрізняються від звичайних гідроелектростанцій. В ГАЕС є великий верхній б'єф, а гідромашини функціонують в двох режимах: під час генерування, вони працюють як турбіни, приведені в рух водою, яка витікає з басейну, і під час накопичення, вони виступають у ролі насосів, які наповнюють басейн знову.

Переваги ГАЕС включають:

- Екологічну безпеку.
- Низькі витрати на експлуатацію.
- Довгий строк служби, який може бути подовжений через капітальний ремонт.
- Здатність довго зберігати енергію.
- Можливість використовувати старі закриті шахти як басейни.

Недоліки ГАЕС включають:

- Складність вибору місця для будівництва.
- Тривалий процес будівництва нових потужностей.
- Інертність в реагуванні на імпульсні стрибки напруги.

- Довгий час переходу між режимами роботи, включаючи зупинку та запуск.
- Присутність великої кількості рухомих частин [22].

Пневмоакумулятори. Дані пристрої є акумуляторами, які зберігають енергію у вигляді стиснутого повітря. Під час накопичення енергії активується компресор, який стискає повітря і зберігає його під великим тиском у спеціальному резервуарі. Коли енергія потрібна для віддачі в електроенергетичну систему, стиснуте повітря з високим тиском подається до турбіни, яка з'єднана з генератором. За основний принцип роботи, цей метод зберігання енергії можна порівняти з гідроакумуляуючими електростанціями (ГАЕС).

Переваги пневмоакумуляторів включають: довготривале зберігання потенційної енергії, швидкий перехід між режимами заряду та розряду, який займає всього кілька секунд. Підвищена пожежна безпека, висока енергоємність, в 2-3 рази вища, ніж у хімічних акумуляторів, екологічна чистота.

Недоліки цієї технології включають: робота під високим тиском, наявність рухомих частин, виділення тепла під час стиснення, що погіршує коефіцієнт корисної дії [23].

Супермаховики. Це особливий вид маховиків, спроектованих для накопичення механічної енергії. На відміну від звичайних маховиків, супермаховики здатні накопичувати більше енергії завдяки використанню магнітних підшипників у їх конструкції та розташуванню обертової частини маховика у вакуумі.

Переваги супермаховиків включають:

- Довговічність, хоча кількість циклів заряду/розряду обмежена.
- Надійність, навіть при можливому пошкодженні, завдяки заходам безпеки.
- Високий коефіцієнт корисної дії, що досягає 98%.

- Простота та низькі витрати на виготовлення, порівняно з хімічними акумуляторами.

- Екологічна чистота.

- Швидка зарядка та розрядка.

- Здатність працювати в будь-якому температурному діапазоні.

Недоліки супермаховиків включають:

- Наявність гіроскопічного ефекту, який ускладнює транспортування супермаховиків, які вже накопили енергію.

- Неможливість використання як джерела живлення для автомобілів.

- Швидкий розряд [24].

Індуктивні надпровідникові накопичувачі. Це пристрої, які накопичують енергію в магнітному полі індукційної котушки, в якій струм циркулює без втрат.

Переваги індуктивних надпровідникових накопичувачів включають:

- Миттєве включення, що дозволяє реагувати на імпульсні зміни в енергосистемі.

- Екологічна чистота - відсутність хімічних реакцій і відходів у процесі роботи.

- Можливість довгострокового зберігання магнітної енергії.

- Здатність живлення установки від джерела з малою електричною потужністю.

- Можливість виділення великих значень струму в момент імпульсу.

- Можливість аварійного скидання енергії без використання додаткових пристроїв.

Недоліки включають:

- Потребу в складній системі охолодження та термостатування для підтримання надпровідного стану.

- Необхідність компенсації великих електродинамічних зусиль в активній зоні.

- Велику кількість обертових елементів.
- Робота з низькими температурами [25].

РОЗДІЛ 3 ВИКОРИСТАННЯ АКУМУЛЯТОРНИХ БАТАРЕЙ ТА ДИЗЕЛЬ-ГЕНЕРАТОРА ДЛЯ РЕЗЕРВУВАННЯ ПОТУЖНОСТІ ЕНЕРГОСИСТЕМИ

3.1 Розрахунок енергетичного балансу об'єкту

В даному розділі проводиться розрахунок автономної фотоелектричної станції з використанням акумуляторних батарей та дизель-генератора для забезпечення енергією споживача.

Автономні станції характеризуються своїми флуктуаціями потужності та жорстким енергетичним балансом, адже все споживання має перекриватися відповідною генерацією. Враховуючи стохастичну природу відновлюваних джерел енергії, а конкретно в даному випадку сонячної енергії, якій притаманні денні піки та нічна відсутність генерації, такі станції потребують додаткових джерел енергії для забезпечення стабільного покриття споживання. Найчастіше для забезпечення безперебійного живлення в комбінації з сонячною станцією використовують акумуляторні батареї, які швидко здатні перекрити недостатній рівень генерації, а також, що є не менш важливим, в період надлишкової генерації накопичити в собі цю енергію для подальшого використання.

В автономних сонячних станціях з акумуляторними батареями, щоб забезпечити повне перекриття споживання без його зниження та відключення, потрібно встановлювати значно більші потужності фотоелектричних модулів та акумуляторів, щоб досягти бажаної надійності електропостачання. Проте такий метод потребує достатньо великих капітальних вкладень. Для більш надійного та диверсифікованого покриття споживання використовують комбінацію сонячної станції, акумуляторних батарей та дизель-генератора. Таким чином для найбільш доцільного співвідношення даних джерел енергії потрібно вирішити задачу оптимізації вибору обладнання. В таких задачах координатами оптимізації виступатимуть потужності обладнання та їх варіативні показники. Параметрами, що досліджуються, будуть

характеристиками засобів акумулювання та резервних балансуючих потужностей, в даному випадку це потужність та ємність АКБ, та потужність дизель-генератора, відповідно. Критерієм оптимальності буде служити варіативність оптимального балансу з урахуванням економічності витрат на паливні ресурси та вартості енергії.

В даній роботі використовується розрахункова модель автономної станції на базі реальних даних сонячної генерації та споживання з існуючих станцій. Таким чином отримано типовий графік генерації та споживання середньостатистичної сонячної станції для перекриття власних потреб. На основі отриманих даних було створено програму розрахунку енергетичного балансу та мінімально необхідної потужності генератора для забезпечення споживання в конкретний момент часу. Розглядається що станція розрахована на забезпечення енергією літнього котеджу з графіком роботи травень-вересень, сумарним часом експлуатації протягом року 5 місяців. Таким чином для розрахунку обрано липень місяць з приблизно середніми даними генерації за обраний період.

Принцип роботи гібридної установки полягає в комбінованому використанні сонячної енергії на забезпечення потреб споживання, за наявності її надлишків, представлений алгоритмом розрахунку, рис. 3.1 – енергія буде накопичуватися в акумуляторних батареях до їх повного заряду. У періоди нестачі чи відсутності сонячної енергії – потреби споживача будуть покриватися з акумуляторів до їх розряду до мінімальної межі, заданої в налаштуваннях роботи системи. Коли баланс енергії залишається від’ємним і значення акумуляторів нижче того, який відповідає за запуск генератора – для забезпечення потреб споживача запускається дизель-генератор, який буде працювати на споживача доки енергетичний баланс системи не стане додатнім, тобто поки не появиться достатньо сонячної енергії, щоб задовольнити потреби навантаження та для заряду АКБ.

В даній роботі розглядаються сучасні літій-залізофосфатні акумуляторні батареї з рекомендованими зарядними-розрядними струмами на рівні 0.5C

(половини ємності АКБ). Таким чином для забезпечення можливості перекриття всієї потужності об'єкта – номінальну ємність акумуляторних батарей слід вибирати вдвічі більшою за максимальну моментальну потужність споживача, яку гарантовано потрібно заживити. В розрахунках акумулятор задається величиною енергії, що накопичується в межах ємності $C(t)$ та потужність, що є характеристикою швидкості розряду.

$$C(t) \in [0.2, C] \quad (3.1)$$

$$C = C_{MAX} - C_{MIN} \quad (3.2)$$

$$P_A(t) \leq \delta C = k_A C \Delta t, \quad (3.3)$$

де C – ємність акумуляторів, що може бути використана, k_A – швидкість розряду акумулятора, C_{MAX} – максимальна ємність системи, C_{MIN} – мінімальна ємність системи, P_A – потужність акумулятора.

Вплив акумулятора на баланс енергосистеми визначається як:

$$p_{i+1,j} = p_j \pm P_A(t) \quad (3.4)$$

$$C(t_{i+1}) = C(t_i) + \max\{p_j, \Delta t; \delta C\}, \quad (3.5)$$

де через напрям заряду визначається знак потужності акумулятора.

Запуск та зупинка генератора визначається за умови негативного енергетичного балансу системи:

$$p_{ij} \leq -k_G P_G \quad (3.6)$$

$$p_{1+i,j} = p_{ij} + P_G, \quad (3.7)$$

де P_G – номінальна потужність генератора, k_G – умова запуску генератора, що визначається розміром енергетичного небалансу.

Таким чином в кожен момент часу t повинен забезпечуватися енергетичний баланс всієї системи:

$$P_S(t) \pm P_A(t) + P_G(t) - P_U(t) = 0, \quad (3.8)$$

де P_S – потужність сонячної генерації, P_U – потужність навантаження.

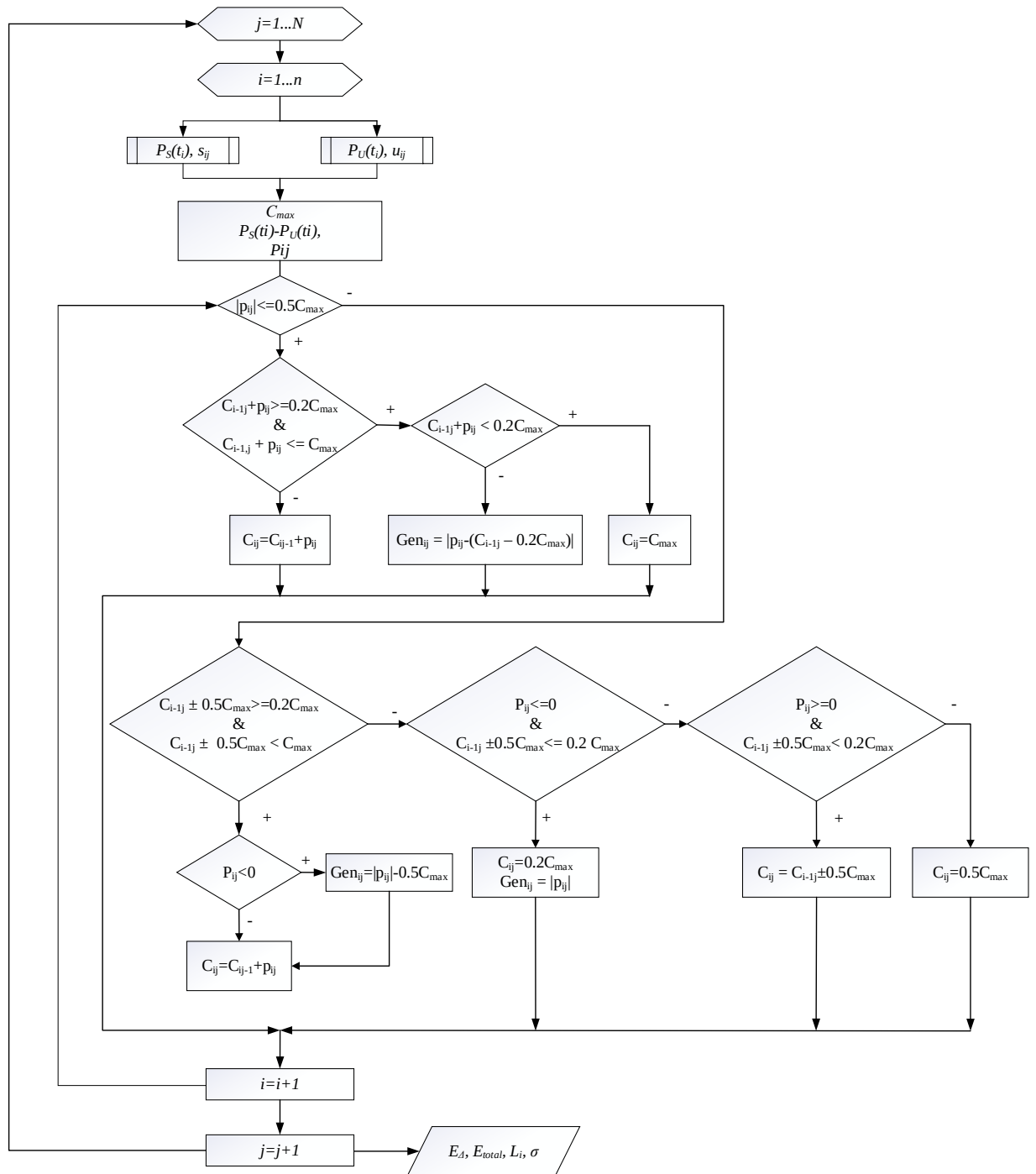


Рисунок 3.1 – Алгоритм розрахунку гібридної СЕС з АКБ та дизель-генератором

Система обміну енергією може бути розглянута як динамічна система з численними входами та виходами. У цьому контексті вхідний сигнал представляє собою результат одночасної дії різних, незалежних джерел енергії та навантажень. Під час динамічної взаємодії відбувається регулювання системи, зокрема обмін енергією в системі акумуляції. На виході системи отримуємо результат у вигляді балансу (або небалансу) потужностей. Постійні

параметри включають номінальні потужності, технічні характеристики обладнання та уставки керування. Поточні потужності сонячної генерації, а також випадкові коливання навантаження можна вважати незалежними. З іншого боку, робота регулюючого генератора залежить від алгебраїчної суми генерації та навантаження, а акумулятора – від їх кумулятивної суми [27].

В даному розрахунку використана схема рис. 3.2, коли дизель-генератор безпосередньо живить споживача напряду, коли баланс енергосистеми є від'ємним. Таким чином не використовується надлишкова енергія генератора на заряд акумуляторної установки, що є значно дорожчим від безпосереднього живлення ним споживача.

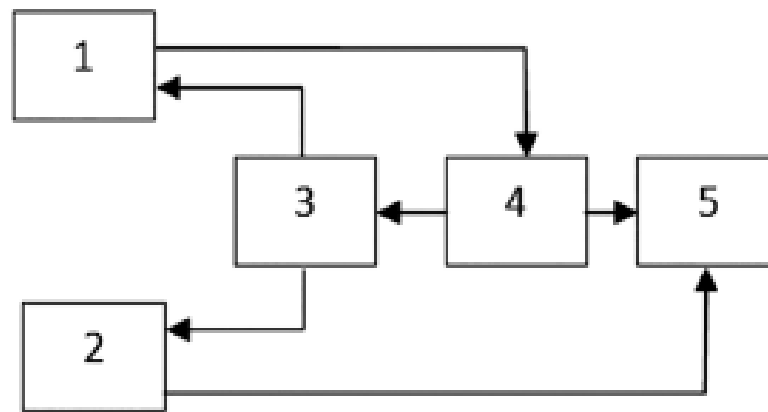


Рисунок 3.2 – Блок-схема використання генератора в гібридній системі [27]

Таким чином за алгоритмом блок-схеми рис. 3.2 відбувається наступний процес роботи: за наявності достатньої сонячної генерації вона покриває все навантаження і надлишками заряджає акумуляторні батареї. Коли акумулятори заряджені повністю і все споживання перекрито – інвертор обмежує свою генерацію у зв'язку з відсутністю джерел її збуту. Коли сонячної генерації недостатньо для перекриття споживання - недостачу енергії покривається за рахунок використання акумуляторних батарей. Коли енергії сонця недостатньо чи вона взагалі відсутня, наприклад, в нічний час, а акумулятор розрядився нижче крайньої нижньої межі – це стає сигналом для підключення генератора, який буде покривати потреби споживача до появи позитивного небалансу, тобто появи достатньої кількості сонячної енергії для забезпечення споживача. В такій системі використання акумуляторних

батареї обмежується швидкістю їх розряду, яка становить $0.5C$ для сучасних літій-залізо-фосфатних АКБ, що відповідає моментальній потужності видачі акумулятора рівній половині всієї ємності парку акумуляторних батарей. Іншими обмежуючими факторами використання АКБ є їх верхня межа заряду, яка відповідає повній ємності, тобто якщо акумулятор повністю заряджений, то він не може більше накопичувати в собі надлишків сонячної генерації, а також нижньою межею розряду АКБ, яка в даному випадку становить 20% від всієї ємності акумулятора, що є рекомендованим значення для безпечної експлуатації АКБ для запобігання їх повного розряду, що є аварійним режимом роботи.

На рис. 3.3-3.11 представлені результати розрахунків програми для трьох варіантів співвідношення споживання, сонячної генерації та ємності акумуляторних батарей, а саме 1:1:1, 1:2:2 та 1:3:2, де представлено співставлений графік генерації та споживання протягом однієї доби, наприклад 15 липня, енергетичний баланс об'єкту для тієї ж доби та сумарне значення виробленої протягом доби енергії шляхом використання дизель-генератора для всього місяця, відносно якого ведеться розрахунок. В додатку А наведено код робочої програми для розрахунку енергетичного балансу.

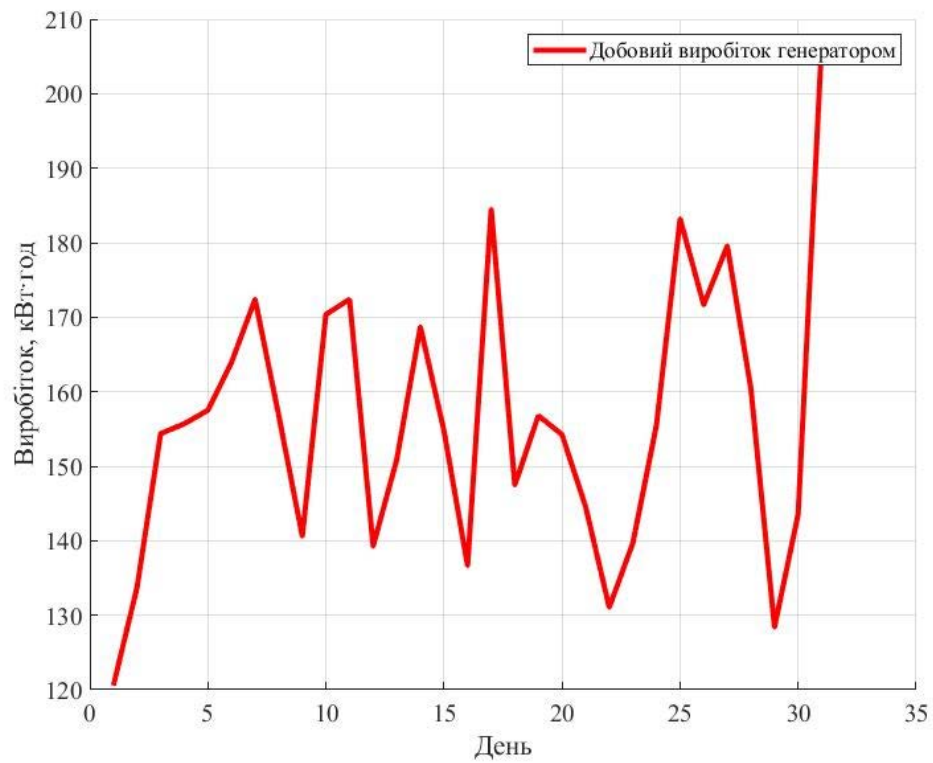


Рисунок 3.3 – Вироблена енергія генератором протягом доби, при співвідношенні 1:1:1

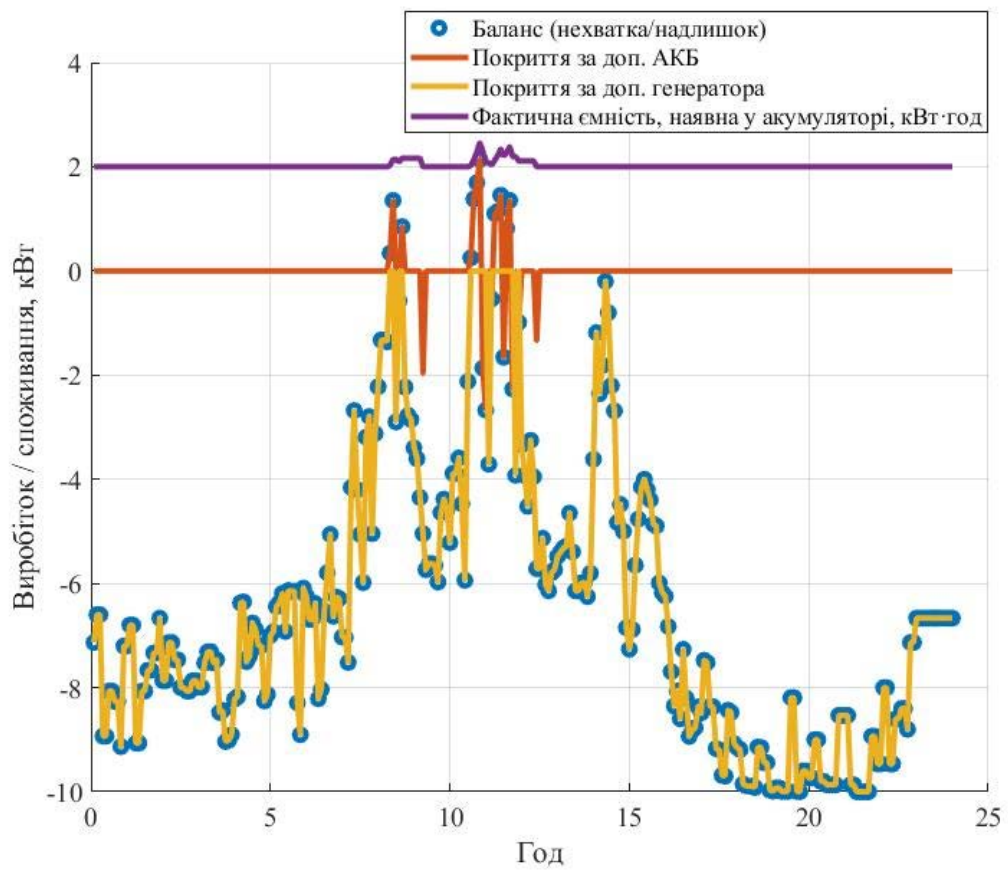


Рисунок 3.4 – Баланс потужності протягом доби, при співвідношенні 1:1:1

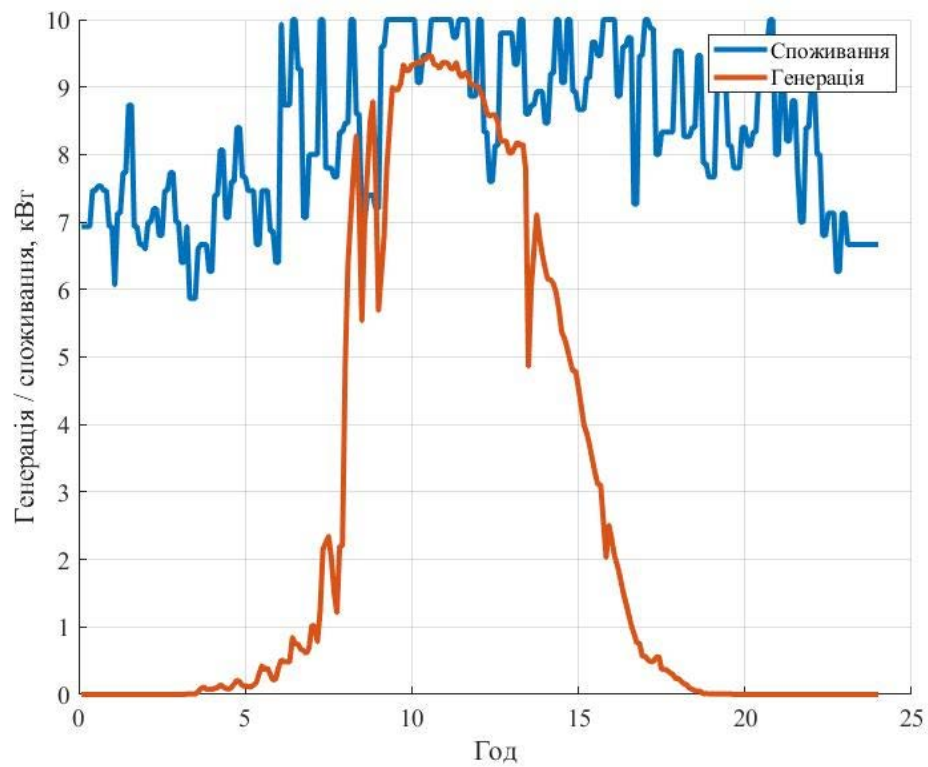


Рисунок 3.5 - Споживання та генерація протягом доби, при співвідношенні 1:1:1

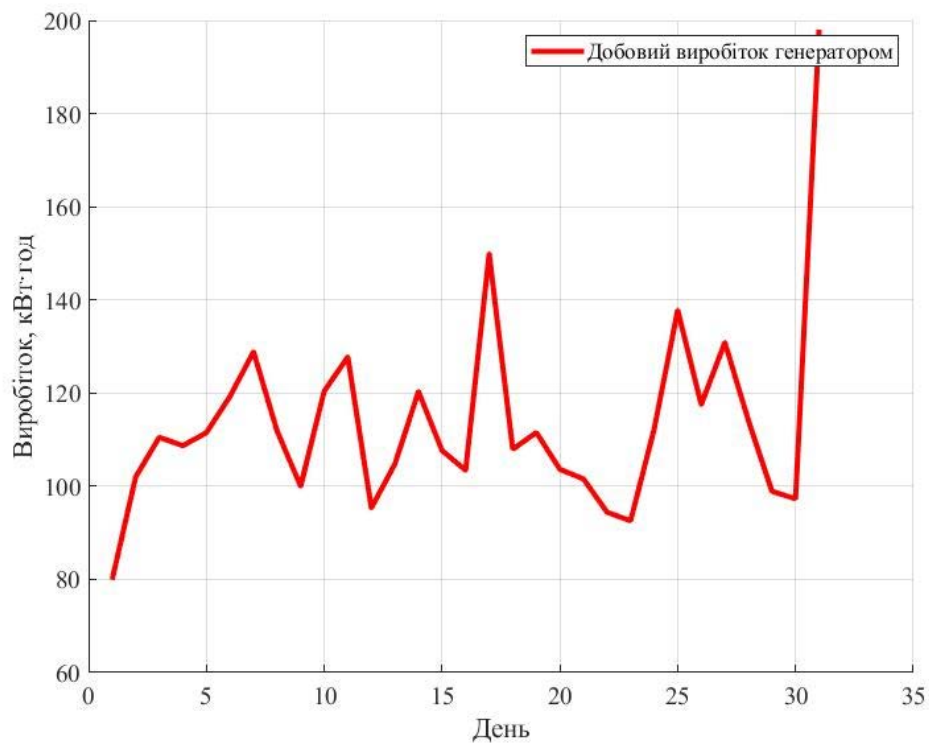


Рисунок 3.6 - Вироблена енергія генератором протягом доби, при співвідношенні 1:2:2

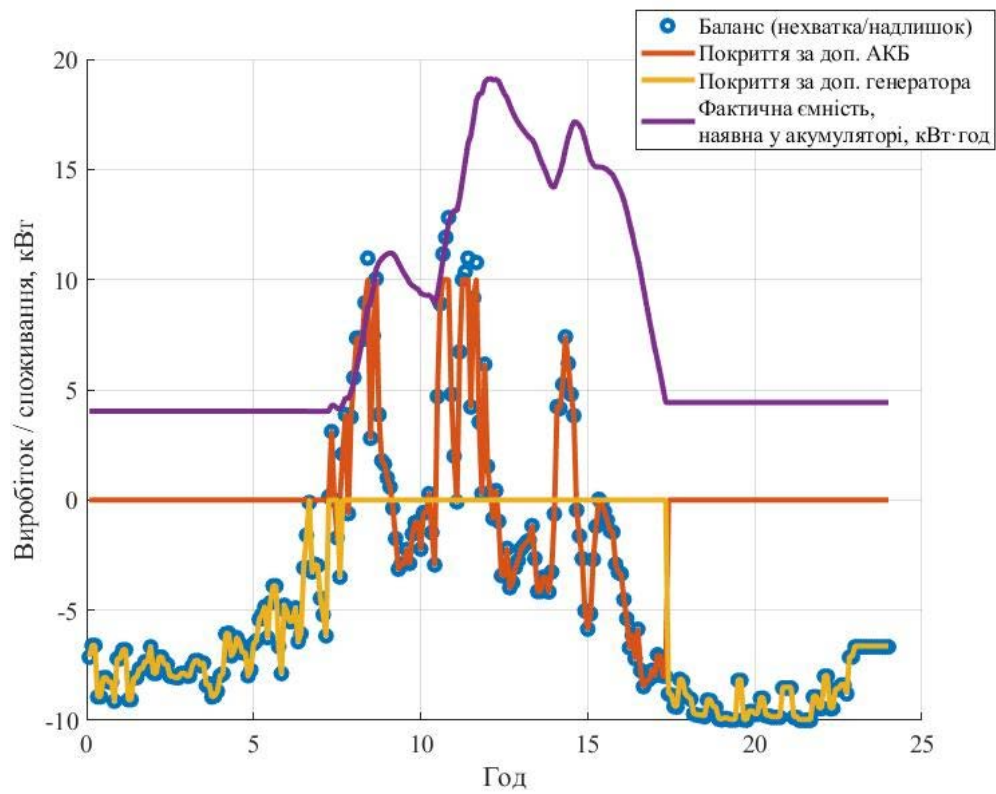


Рисунок 3.7 - Баланс потужності протягом доби, при співвідношенні 1:2:2

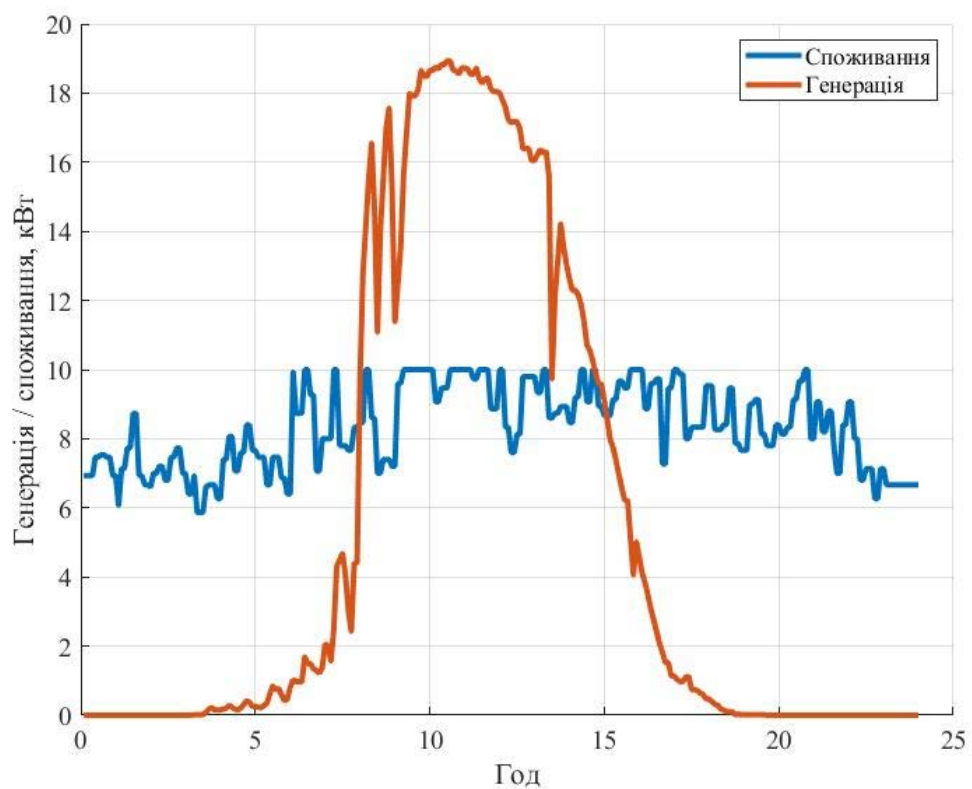


Рисунок 3.8 – Споживання та генерація протягом доби, при співвідношенні 1:2:2

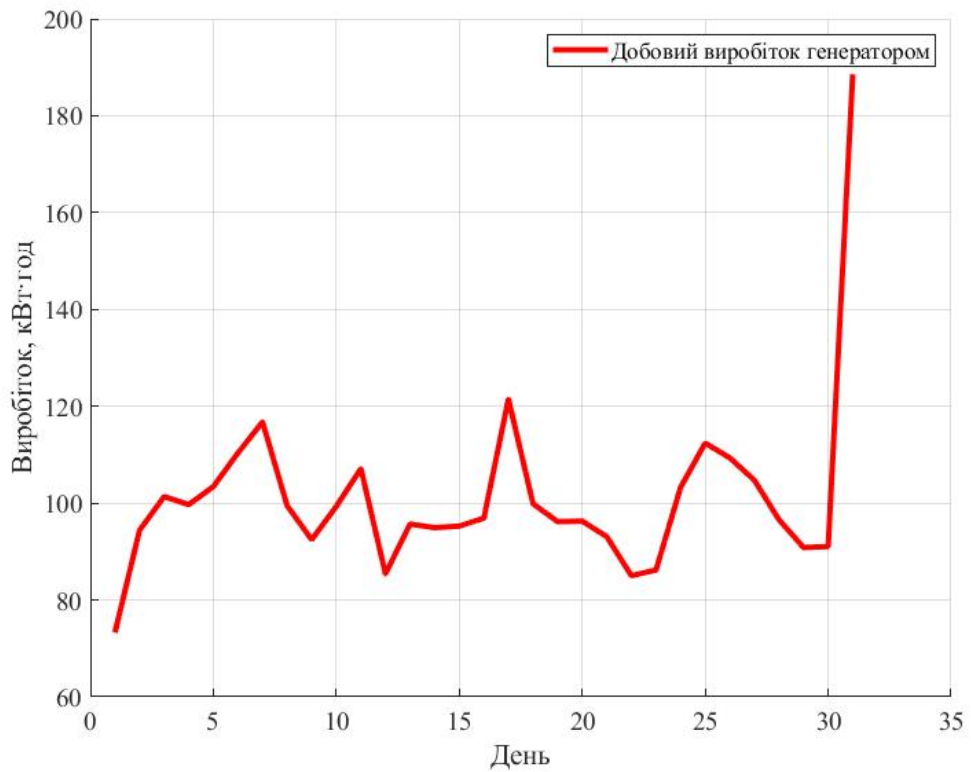


Рисунок 3.9 - Вироблена енергія генератором протягом доби, при співвідношенні 1:3:2

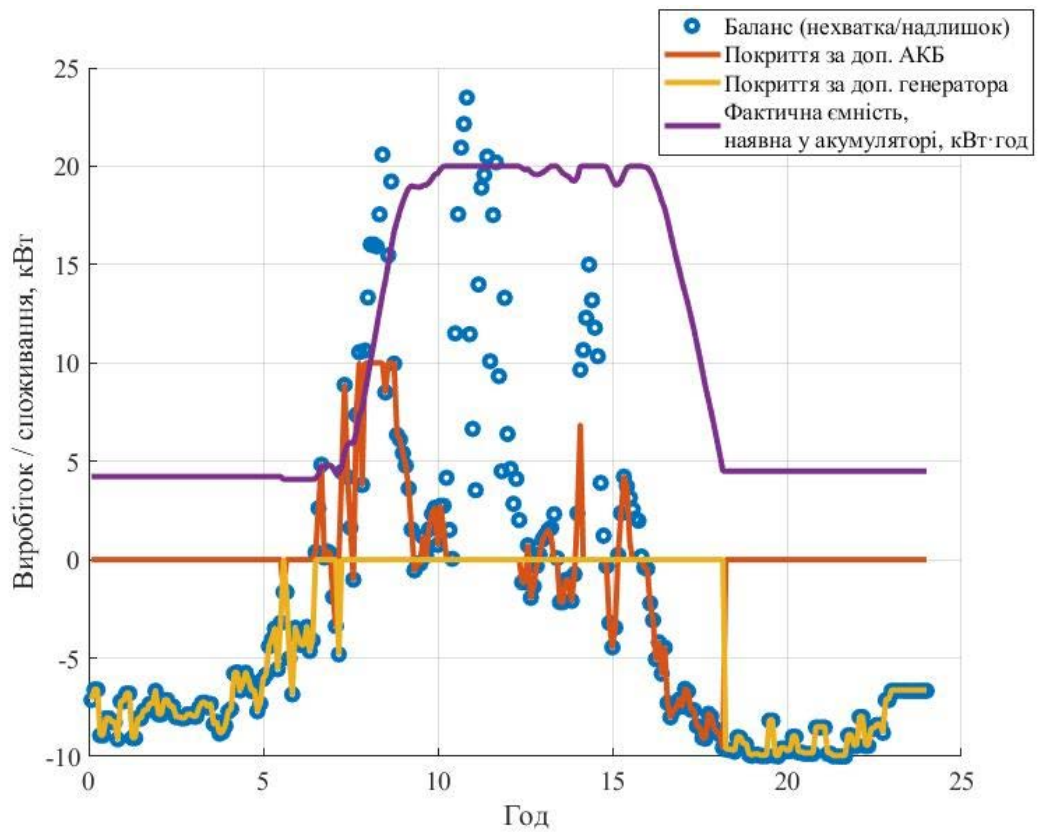


Рисунок 3.10 - Баланс потужності протягом доби, при співвідношенні 1:3:2

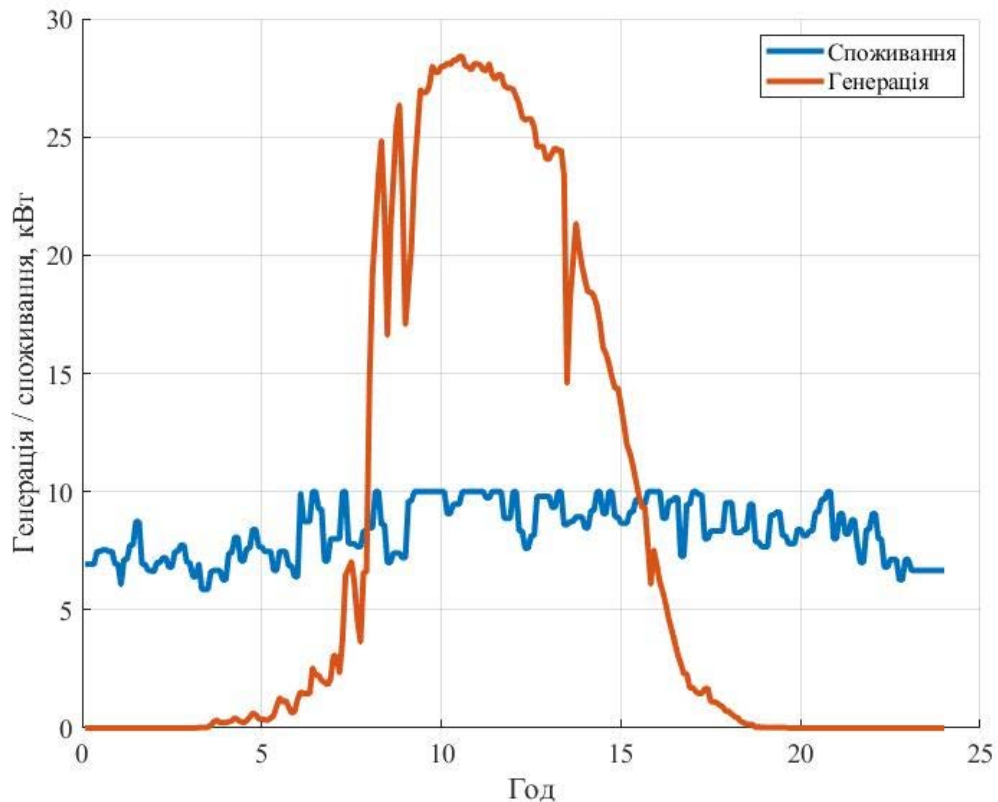


Рисунок 3.11 - Споживання та генерація протягом доби, при співвідношенні 1:3:2

3.2 Економічний розрахунок

Для визначення оптимального співвідношення потужності сонячних панелей та акумуляторних батарей для мінімального використання генератора з мінімальними капітальними вкладеннями, при цьому забезпечуючи достатню надійність всієї системи, потрібно провести економічний розрахунок всього обладнання та витрати на роботу генератора протягом певного розрахункового періоду, за який буде вестися порівняння.

Як вже вище згадувалося, установка передбачається для забезпечення потреб літнього котеджу, що працюватиме протягом травня-вересня, таким чином в розрахунок оптимального співвідношення береться саме цей часовий проміжок в 5 місяців. Приймаємо, що встановлена потужність споживача не буде перевищувати верхньої межі в 10 кВт, при цьому її динамічний графік є змінним. Маючи реальні дані споживання та генерації сонячних станцій на

території України, використано узагальнені їх значення, що були зведені до відносних одиниць. Таким чином можна ввести коефіцієнт потужності N , яким буде визначатися встановлена потужність всього необхідного обладнання.

Як було зазначено вище споживач обирається потужністю 10 кВт, таким чином мінімальна потужність встановленого обладнання не повинна бути нижчою за це значення. Подальше необхідне співвідношення буде вираховуватися відносно мінімальної встановленої потужності. Враховуючи модульність всього обладнання сонячної електростанції, а саме інверторів, сонячних панелей та акумуляторних батарей, на даному етапі розрахунку було проведено дослідження ринку сонячної енергетики України з метою вибору типу та моделі обладнання для подальшого масштабування станції з врахуванням цінових особливостей, для вибору найбільш оптимального його співвідношення.

Інвертор

Вибрано гібридний інвертор компанії Sofar моделі HYD. Технічні характеристики представлено в табл. 3.1.

Трифазний гібридний інвертор серії HYD 5~20KTL-3PH широко використовується в сценаріях накопичення енергії в житлових приміщеннях, невеликих системах зберігання енергії C&I. Максимальний ККД може досягати 98,2%. Має двоканальне відстеження та конфігурацію MPPT Більша гнучкість; сторона змінного струму підтримує трифазний незбалансований вихід; максимальний струм заряду і розряду може досягати 2*25А; має функцію ДБЖ (джерела безперебійного живлення) для забезпечення стабільної роботи основних навантажень; він підтримує кілька режимів роботи для задоволення потреб у різноманітних сценаріях. Дана модель може працювати з новітніми високовольтними акумуляторами. Інвертор є одним з найкращих представників середньої цінової категорії на ринку України.

Таблиця 3.1 – Паспортні дані інвертора Sofar HYD 20TKL-3PH

Параметр	Значення
Максимальна напруга PV	1000 В
Стартова напруга PV	200 В
Діапазон MPPT	180-960 В
Кількість MPPT	2/2
Максимальний струм МТТР	25/25 А
Струм короткого замикання	30/30 А
Робоча напруга АКБ	180-800 В
Максимальний струм заряду / розряду	25/25 А
Тип АКБ	Літій-іон
Напруга мережі	380/400 В
Робоча частота мережі	50/60 Гц
Максимальний струм мережі	60.6 А
Потужність бекапу	20 кВт
THD	<3%
Максимальна ефективність	98.2%
Клас захисту	IP65

Технічними особливостями даної моделі, що істотно вирізняє її з-поміж інших інверторів є можливість паралельного підключення до 10 інверторів в одну систему на спільного споживача, можливість перекриття роботи незбалансованого споживача, що дає змогу якісно більшого заміщення власних потреб за рахунок сонячної енергії. Також інвертор має можливість управління старту та зупинки генератором в автономному режимі по параметрам стану заряду акумулятора за допомогою сухого контакту. В цій лінійці представлені інвертори потужністю 5 - 20 кВт, що дає можливість обрати найбільш підходящий з них відповідно до потреб об'єкту.

Сонячні панелі

Вибрано сонячні панелі JA SOLAR JAM72S30-555/GR. Технічні характеристики представлено в табл. 3.2.

Сонячна панель Ja Solar JAM72S30-555/GR відзначається найвищою потужністю на ринку, досягаючи 555 Вт. Китайська компанія Ja Solar відома як виробник високоякісних фотомодулів, які відповідають міжнародним стандартам якості та надійності, і постійно входить до топ-5 Tier1 виробників.

Таблиця 3.2 – Паспортні дані ФЕМ JA SOLAR JAM72S30-555/GR

Параметр	Значення
Потужність	555 Вт
Напруга НХ	50.15 В
Максимальна робоча напруга	42.11 В
Струм КЗ	14.07 А
Максимальний робочий струм	13.18 А
Ефективність	21.5 %
Температурний коефіцієнт I_{K3}	0.045 %/°C
Температурний коефіцієнт $U_{НХ}$	-0.275 %/°C
Температурний коефіцієнт Р	-0.350 %/°C

Температурний коефіцієнт потужності складає -0.350% на градус Цельсія, що визначається як високий стандарт для фотомодулів. Це сприяє ефективній роботі панелі при високих температурах, особливо влітку. Коефіцієнт ККД JAM72S30-555/GR досягає 21.5%, що свідчить про високу ефективність перетворення сонячного випромінювання в електроенергію. З 11 струмознімними доріжками та підвищеною механічною стійкістю до статичного навантаження з фронтальної (5400 Па) та тильної сторін (2400 Па), панель демонструє високу надійність. Вона також витримує град діаметром 3 мм при швидкості в 20 м/с. Захист стандарту IP68, а низький рівень LCOE робить її економічно вигідною. Лише -0.55% річної деградації протягом 25 років гарантує високу стабільність продуктивності. Після 25 років панель

втратить лише 16% своєї початкової потужності. Корпус фотомодуля виготовлений з анодованого алюмінію, забезпечуючи йому стійкість до корозії. Робочий температурний діапазон від -40 °C до +85 °C підтримує ефективну роботу панелі, а номінальна температура становить 45 ± 2 °C.

Акумуляторні батареї

Вибрано літій-залізо-фосфатні АКБ Sofar BTS E5DS5 Технічні характеристики представлено в табл. 3.3.

Таблиця 3.3 – Паспортні дані акумуляторної батареї BTS E5DS5

Параметр	Значення
Тип	Літій-залізо-фосфат
Система управління	BTS 5K-BDU
Акумуляторний модуль	BTS 5K
Повна енергія АКБ	5.15 кВт-год
Доступна енергія АКБ	4.75 кВт-год
Номінальна напруга АКБ	400 В
Діапазон робочої напруги АКБ	350-425 В
Робочий зарядний/розрядний струм одного акумуляторного модуля	7 А

Літієва акумуляторна батарея BTS E5-20-DS5 HV для накопичення енергії підходить для зберігання енергії в житлових приміщеннях і для невеликих сценаріїв зберігання енергії C&I. Акумуляторна установка має модульну конструкцію та може збільшити ємність акумулятора до 5-40 кВт/год. Інтегрований модуль контролю потужності вирішує проблему невідповідності ємності, а доступна енергія акумулятора збільшена на 6%. Багатошарова конструкція підтримує змішане використання старих і нових батарей, що полегшує установку та експлуатацію. Завдяки використанню елементів літій-залізо-фосфатної батареї та конструкції подвійної фізичної та електричної ізоляції на стороні батареї система є безпечнішою та надійнішою.

У поєднанні з інверторами серії SOFAR HYD 5~20KTL-3PH вона може забезпечити безперервну роботу споживачів.

Дизель-генератор

Вибрано дизель-генератор SDMO K16H Adriatic (Kohler). Технічні характеристики представлено в табл. 3.4.

Таблиця 3.4 – Паспортні дані генератора SDMO K16H Adriatic (Kohler)

Параметр	Значення
Максимальна потужність	12.8 кВт
Номінальна потужність	11.5 кВт
Робоча напруга	380 В
Робоча частота напруги	50 Гц
Витрата палива	3.63 л/год
Частота обертів двигуна	1500 об/хв
Тип запуску	автозапуск
Охолодження	рідинне
Клас захисту	IP23
Габарити	1410x720x1020 мм

Дизельна електростанція SDMO K16H Adriatic (Kohler) є потужним і надійним джерелом електропостачання, яке відзначається високою продуктивністю та відмінною якістю. Високоефективний дизельний двигун від Kohler гарантує надійну роботу електростанції. Цей двигун відомий своєю довговічністю, економічністю в споживанні пального та ефективністю у роботі. Генератор оснащений системою автоматичного пуску, яка забезпечує автоматичний запуск генератора у випадку відключення основного джерела електропостачання. Це дозволяє забезпечити неперервне живлення без необхідності ручного втручання. Генератор володіє високоефективною системою вихлопів, що відповідає екологічним стандартам і забезпечує низький рівень викидів.

Маючи усю необхідну номенклатуру основного обладнання, можна порівняти його роздрібну вартість, та яке співвідношення обладнання є найоптимальнішим для використання літнього котеджу. В табл. 3.5 наведено вартість основного обладнання та її перерахунок на 1 кВт для проведення порівняльного аналізу.

Таблиця 3.5 – Вартість обладнання з перерахунком на 1 кВт

Обладнання	Вартість, грн	Вартість, грн/кВт (грн/кВт·год)
Sofar HYD 20TKL-3PH	130 176,22	6 509
Sofar HYD 15TKL-3PH	122 640,06	8 176
Sofar HYD 10TKL-3PH	111 373,44	11 137
Середнє значення для моделі Sofar HYD		8 607
JA SOLAR JAM72S30-555/GR	6 116	11 020
Sofar BTS 5K	112 033.88	22 407
SDMO K16H Adriatic (Kohler)	453 519	45 358

Вартість проєкту складається з постійної складової, а саме вартості обладнання, та змінної складової – поточні (експлуатаційні) витрати. При переході до дорожчого обладнання з меншими експлуатаційними витратами, дає можливість з часом збільшити економію в поточних витратах, що перебиває початкові витрати на більш дороге обладнання. В даному випадку контрольний варіант лише дизель-генератор, а додатковими будуть витрати на сонячну станцію та акумуляторні батареї. Варто зазначити, що в довготривалій перспективі експлуатаційними витратами будуть не лише витрати на паливо, але й витрати на обслуговування станції, плата за викиди відпрацьованих газів, проте через відносно невеликий термін, що береться в розрахунок дана модель спрощується і цими складовими можна знехтувати, як такими, що мізерні, порівняно з паливною складовою.

Для розрахунку оптимального співвідношення встановленого обладнання задамо ряд потужностей, для яких порівнюємо вартість

встановленого обладнання та частку використання генератора з контрольною вартістю обладнання та витратою на роботу генератора, без використання сонячної станції. Така порівняльна таблиця дасть зрозуміти допустимий максимум сонячної станції, разом з мінімумом використання роботи генератора з економічної точки зору.

Розглянемо наступний ряд співвідношення потужностей споживання, сонячної генерації та ємності акумуляторних батарей. Для кожного значення даного приросту вирахуємо вартість всього обладнання, а також місячний виробіток енергії генератором, для заміщення дефіциту енергії від сонячної станції.

Для кожного набору обладнання його сумарна вартість розраховується за наступною формулою:

$$PRICE = INV \cdot N + PV \cdot N + BAT \cdot N \cdot \text{год} + GEN \cdot N, \quad (3.9)$$

де N – коефіцієнт потужності, має значення від 10 до 60, кВт, INV – вартість 1 кВт потужності інвертора, грн/кВт, PV – вартість 1 кВт потужності сонячних панелей, грн/кВт, BAT – вартість 1 кВт·год ємності акумуляторних батарей, грн/кВт·год, GEN – вартість 1 кВт потужності генератора, кВт.

Виконаємо підстановку для першого значення:

$$PRICE = 8607 \frac{\text{грн}}{\text{кВт}} \cdot 10 \text{ кВт} + 11020 \frac{\text{грн}}{\text{кВт}} \cdot 10 \text{ кВт} + 22407 \frac{\text{грн}}{\text{кВт} \cdot \text{год}} \cdot 10 \text{ кВт} \cdot \text{год} + 45358 \frac{\text{грн}}{\text{кВт}} \cdot 10 \text{ кВт} = 873\,923 \text{ грн}$$

Щоб розуміти, скільки коштів витрачається на роботу генератора протягом типового місяця, проведено розрахунок витрати палива та його вартості, дані розрахунків наведено в табл. 3.6.

$$G_{price} = G_{DP} \cdot DP = 3.63 \frac{\text{л}}{\text{год}} \cdot 54.99 \frac{\text{грн}}{\text{л}} = 199.6 \frac{\text{грн}}{\text{год}}, \quad (3.10)$$

де G_{price} – вартість однієї години роботи генератора, грн/год, G_{DP} – витрата палива генератором, л/год, DP – вартість палива, грн/л.

$$GP = G_{price} \cdot G_{prod} = 199.6 \frac{\text{грн}}{\text{год}} \cdot 483.61 \text{ год} = 96\,535 \text{ грн}, \quad (3.11)$$

де GP – вартість місячного виробітку енергії генератором, грн, G_{prod} – час роботи генератора протягом місяця, год.

Таблиця 3.6 – Вартість обладнання та місячний виробіток генератора для різного співвідношення потужності

Співвідношення потужності С:Г:А	Вартість встановленого обладнання, грн	Вартість місячного виробітку енергії генератором, грн
1:1:1	873 923	96 535
1:2:2	1 294 267	70 247
1:3:2	1 490 540	62 693
1:3:3	1 714 610	57 784
1:4:3	1 910 833	54 073
1:4:4	2 134 953	49 101
1:5:4	2 331 227	46 554
1:5:5	2 555 297	41 671
1:6:5	2 751 570	39 723

Контрольним буде випадок роботи котеджу напряму від генератора протягом усього часу, таким чином генератор повинен працювати без зупину і його виробіток за місяць складе 744 год.

Для визначення економічної вигоди того чи іншого варіанту проведено порівняння кожного з них порівняно з контрольним щоб обрати найбільш оптимальний. Дані відношення наведені в табл. 3.7.

$$OPT = \frac{PRICE - GEN \cdot N + GP \cdot n}{GP_K \cdot n}, \quad (3.12)$$

де OPT – відношення заданого варіанту роботи, до контрольного, GP_K – контрольна вартість місячного виробітку енергії генератором, грн, n – кількість місяців, що оцінюється в розрахунку.

Таблиця 3.7 – Співвідношення витрат СЕС різної потужності

Місяць роботи	Співвідношення витрат для кожного рівня потужності								
	1:1:1	1:2:2	1:3:2	1:3:3	1:4:3	1:4:4	1:5:4	1:5:5	1:6:5
1	3.48	6.134	7.404	8.88	10.177	11.652	12.956	14.432	15.741
2	2.065	3.304	3.913	4.635	5.27	5.991	6.635	7.356	8.004
3	1.593	2.36	2.75	3.219	3.635	4.104	4.528	4.998	5.425
4	1.358	1.888	2.168	2.512	2.817	3.161	3.474	3.819	4.136
5	1.216	1.605	1.819	2.087	2.327	2.595	2.842	3.111	3.362
6	1.122	1.417	1.586	1.804	2	2.218	2.421	2.639	2.846
7	1.054	1.282	1.42	1.602	1.766	1.948	2.12	2.302	2.478
8	1.004	1.181	1.295	1.45	1.591	1.746	1.894	2.05	2.202
9	0.964	1.102	1.198	1.333	1.454	1.589	1.718	1.853	1.987
10	0.933	1.039	1.12	1.238	1.345	1.463	1.578	1.696	1.815
11	0.907	0.988	1.057	1.161	1.256	1.36	1.463	1.567	1.674
12	0.886	0.945	1.004	1.097	1.182	1.274	1.367	1.46	1.557
13	0.868	0.909	0.959	1.042	1.119	1.201	1.286	1.369	1.458
14	0.852	0.878	0.921	0.996	1.065	1.139	1.217	1.291	1.373
15	0.839	0.851	0.888	0.955	1.018	1.085	1.156	1.224	1.299
16	0.827	0.827	0.859	0.92	0.977	1.038	1.104	1.165	1.235
17	0.817	0.806	0.833	0.889	0.941	0.997	1.057	1.113	1.178
18	0.807	0.788	0.81	0.861	0.909	0.96	1.016	1.067	1.127
19	0.799	0.771	0.79	0.836	0.881	0.926	0.979	1.025	1.082
20	0.792	0.756	0.771	0.814	0.855	0.897	0.946	0.988	1.041

Як можна побачити з табл. 3.7, після 17-го місяця роботи співвідношення 1:2:2 стало найбільш економічно вигідним і така тенденція залишилася й надалі. Таким чином можна остаточно прийняти висновок, що станція, необхідна для роботи літнього котеджу з потужністю споживання 10 кВт, потрібно встановити 20 кВт потужності по сонячним панелям, а також

20 кВт·год акумуляторних батарей для забезпечення найбільш економічно вигідного співвідношення використання сонячної станції та дизель-генератора. В додатку Б представлено схематичне зображення взаємозв'язків елементів комбінованої системи, а в додатку В представлено схему приєднань електричного обладнання системи.

3.3 Кошторис автономної станції з дизель-генератором

Для визначення окупності всієї установки було проведено розрахунок вартості всієї електроенергії, потрібної для забезпечення літнього котеджу за рахунок одного лише дизель-генератора.

Умовою окупності буде слугувати таке співвідношення, при якому

$$OPT \leq 1 \quad (3.13)$$

Маючи вартість виробленої енергії за місяць за рахунок лише одного генератора можна вирахувати за скільки місяців роботи автономної фотоелектричної станції з акумуляторними батареями та додатковим дизель-генератором буде економічно вигіднішим, ніж використання лише дизель-генератора. У цьому випадку в розрахунках вказується повна вартість всієї станції, яку розраховано в кошторисі, табл. 3.8.

$$n = \frac{PS - GEN}{GP_K - GP} = \frac{1\,599\,985,081 - 453\,519}{148\,512,6 - 70\,274} = 15 \text{ міс}, \quad (3.14)$$

де PS – загальна вартість системи, грн, GP – вартість місячного виробітку енергії генератором, грн, GP_K – вартість місячного виробітку енергії генератором, без АФЕС, грн;

Отже, окупність системи вартістю 1 599 985,081 буде становити 15 місяців, що дає зробити висновок, що за три сезони роботи літнього котеджу при використанні сонячної станції потужністю 20 кВт та акумуляторних батарей ємністю 20 кВт·год, з додатковим дизель-генератором стане економічно вигіднішим за використання лише самого дизель-генератора для забезпечення потреб споживача в електроенергії.

Таблиця 3.8 – Кошторис автономної станції з дизель-генератором

№	Обладнання	К-ть	Ціна, грн	Сума, грн
1	Фотомодуль JA SOLAR JAM72S30-555/GR	45	6 116	275 220
2	Інвертор Sofar HYD 20TKL-3PH	1	130 176,22	130 176,22
3	Акумуляторний блок Sofar BTS 5K	4	112 033.88	448 135,52
4	Модуль контролю потужності BTS 5K-BDU	1	16 370,02	16 370,02
5	Генератор SDMO K16H Adriatic (Kohler)	1	453 519	453 519
6	Система кріплення на 15 фотомодулів	3	13 842,64	41 527,92
7	Сонячний кабель 6 мм ²	100 м	4 200.9	4 200.9
8	Щит змінного струму AC 3-100 S	1	60 413,16	60 413,16
9	Щит постійного струму DC 2.2	1	14 969,34	14 969,34
10	Додаткові витратні матеріали	1	10 000	10 000
Загальна вартість обладнання				1 454 532,081
11	Витрати на монтаж системи			145 453
Загальна вартість системи				1 599 985,081

РОЗДІЛ 4 РОЗРОБЛЕННЯ СТАРТАП ПРОЄКТУ

4.1 Розробка програми оптимізації використання сонячної станції разом з дизель-генератором

Метою даного стартап проєкту є забезпечення постійного та надійного електропостачання споживачеві за відсутності зовнішньої електромережі, при цьому дотримуючись максимального покриття споживання за мінімальних на це витрат, шляхом використання розробленої в даній роботі програми. Крім цього дана розробка допомагає забезпечити збільшення екологічності автономних споживачів, за рахунок максимального впровадження в їх роботу зелених відновлюваних джерел енергії, тим самим мінімізуючи вплив викопних палив, за рахунок їх заміщення.

Для кінцевого користувача даний стартап проєкт має на меті знизити витрати на електроенергію шляхом комбінованого використання сонячної станції разом з акумуляторними батареями та дизель-генератора, при їх оптимальному поєднанні для досягнення найбільшої вигоди. Крім цього, суть програми полягає в швидкому та зрозумілому розрахунку необхідних потужностей станції за наданими графіками генерації та споживання.

Даний проєкт є доступним для реалізації зі споживачем великого різноманіття потужностей та особливостей, за рахунок модульності та великого спектру наявного на ринку енергетичного обладнання.

4.2 Основна ідея проєкту

Зміст ідеї. Використання програми для підбору необхідної потужності сонячної станції з акумуляторними батареями в поєднання з дизель-генератором для забезпечення безперебійного живлення споживача, що не має підключення до центральної електромережі. Таким чином можна забезпечити швидкий та цілісний розрахунок автономної станції із найбільш оптимальним підбором обладнання.

Напрямок застосування: автономні об'єкти без підключення до центральної електромережі, сонячні електростанції, системи накопичення енергії, генераторні установки.

Переваги користувача. Швидкий, легко зрозумілий та ефективний розрахунок комбінованої автономної електричної станції з використанням сонячних панелей, акумуляторних батарей та резервного дизель-генератора з найбільш оптимальним їх використанням для отримання максимальної вигоди із мінімізацією вкладених коштів.

4.3 Переваги стартап проєкту

Забезпечення максимальної ефективності сонячних панелей шляхом точного прогнозування та розподілу сонячної генерації. Раціональне управління енергією допомагає зменшити витрати електроенергії та знизити рахунки за неї. Визначення мінімальної необхідної потужності дизель-генератора дозволяє зекономити на витратах на паливо, а розрахунок оптимального співвідношення сонячної енергії, акумуляторів та генератора сприяє економічній вигоді.

Гарантоване постачання електроенергії навіть в умовах змінної сонячної генерації. Збільшення використання відновлювальних джерел енергії сприяє зменшенню викидів парникових газів та покращенню екологічної ситуації. Автоматизований розрахунок терміну окупності дозволяє користувачам зрозуміти швидкість повернення витрат на встановлення системи, при цьому проводиться вибір найбільш економічно вигідних рішень з погляду обладнання та експлуатації.

4.4 Технологічний аудит стартап проєкту

Для функціонування даної програми потрібно забезпечити графіки споживання та генерації сонячної енергії за вказаний проміжок часу. Це можуть бути як реальні дані зняті з того чи іншого об'єкту за певний проміжок часу та масштабовані до необхідної величини чи теоретичні дані, які будуть базуватися на даних про наявного споживача та даних про теоретичну

генерацію сонячної енергії в конкретному регіоні. За результатами розрахунку програми підбирається оптимальне співвідношення потужностей затребуваних джерел енергії, для цього також потрібно вказати точні чи орієнтовані значення вартості всього обладнання, що дасть змогу вирахувати термін окупності такої станції порівняно з контрольним джерелом енергії.

4.5 Огляд ринку для старту проєкту

Зростання попиту на відновлювальну енергію, світовий інтерес до відновлювальних джерел енергії постійно зростає. Проєкти, спрямовані на оптимізацію та ефективне використання сонячної енергії, стають все більш актуальними.

Енергетична ефективність в комерційних об'єктах, комерційні підприємства та промисловість шукають способи зменшення витрат на енергію. Дана система може бути вигідною для компаній, які прагнуть оптимізувати внутрішні енергетичні процеси.

Автономні та віддалені регіони, віддалені об'єкти, де відсутній стабільний доступ до мережі, можуть вигідно використовувати сонячні панелі та генератори, такий проєкт надасть їм можливість автоматизувати вибір та підбір оптимальних енергетичних джерел.

Таблиця 4.1 – SWOT-аналіз стартап проєкту

Сильні сторони. Технологічна інновація: використання передових технологій та алгоритмів машинного навчання для оптимізації виробництва та споживання енергії. Гнучкість та масштабованість: архітектура, яка легко масштабується та адаптується до змін у виробництві та енергетичних потоках.	Слабкі сторони. Вартість впровадження: значна вартість встановлення систем енергетичної оптимізації може стати перешкодою для малих бізнесів або приватних осіб. Залежність від погодних умов: система чутлива до змін погодних умов, що може впливати на точність
--	--

Співпраця з іншими виробниками: можливість встановлювати партнерства з виробниками сонячних панелей, акумуляторів та генераторів для розширення функціоналу. Зменшення енерговитрат: забезпечення оптимального використання енергії та зменшення витрат на електроенергію через систему автоматизації.	прогнозів та ефективність оптимізації. Конкуренція на ринку: зростання конкуренції в сфері енергоефективності вимагає сильної стратегії маркетингу та продажів.
Можливості. Розширення географічного поширення: можливість використання розширених географічних областей зі зростанням інтересу до відновлювальних джерел енергії. Співпраця з галузевими лідерами: можливість партнерства та співпраці з галузевими лідерами для розширення ринкових можливостей та прискорення впровадження. Фінансова підтримка та субсидії: залучення фінансової підтримки та субсидій з боку уряду чи енергетичних організацій для зменшення витрат на встановлення.	Загрози. Зміни в регуляційному середовищі: можливість змін у регуляторних вимогах та стандартах енергоефективності, що може вплинути на діяльність проекту. Економічні труднощі: світові економічні або фінансові труднощі можуть знизити інвестиційний інтерес відновлювальних енергетичних проектів. Технічні неполадки: можливі технічні проблеми або несправності в роботі обладнання, що може призвести до перебоїв у постачанні електроенергії.

РОЗДІЛ 5 ОХОРОНА ПРАЦІ

Правила технічної експлуатації електроустановок споживачів визначають основні організаційні та технічні вимоги до функціонування електроустановок та електрообладнання споживачів. Ці правила розповсюджуються на електроустановки до 1000 В, які знаходяться у власності населення, зокрема щодо проведення випробувань та вимірювань параметрів електрообладнання.

Вони є обов'язковими для працівників, які відповідають за експлуатацію електроустановок споживачів, керування режимами електроспоживання, інспектування таких установок, а також для підприємств, установ і організацій, які займаються різними аспектами робіт з електроустановками, включаючи науково-дослідні, проектно-конструкторські та ремонтні роботи.

Всі існуючі та будівництвом, реконструкцією чи модернізацією створювані електроустановки споживачів повинні відповідати чинним "Правилам улаштування електроустановок" (ПУЕ) та іншим нормативним документам. Для електрообладнання спеціальних електроустановок до 10 кВ також слід дотримуватись ДНАОП 0.00-1.32-01 "Правила будови електроустановок. Електрообладнання спеціальних установок".

Технічна експлуатація електроустановок споживачів може здійснюватися за спеціальними правилами, установленими відповідною галуззю. Галузеві норми не повинні суперечити загальним правилам і ДНАОП 0.00-1.21-98 "Правила безпечної експлуатації електроустановок споживачів", затвердженими Державним комітетом України по нагляду за охороною праці.

Сонячна станція являється електроустановкою напругою до 1000 В, тому підпадає під дію наступних нормативних документів:

- ДНАОП 0.00-1.21-98 Правила безпечної експлуатації електроустановок споживачів, затверджені наказом Державного комітету України по нагляду за охороною праці від 09.01.98 № 4, зареєстровані в Міністерстві юстиції України 10.02.98 за № 93/2533.

- ДНАОП 0.00-1.32-01 Правила будови електроустановок. Електрообладнання спеціальних установок, затверджені наказом Міністерства праці та соціальної політики України від 21.06.2001 № 272.
- ДНАОП 1.1.10-1.07-01 Правила експлуатації електрозахисних засобів, затверджені наказом Міністерства праці та соціальної політики України від 05.06.2001 № 253.
- ДСанПіН № 3.3.6.096-2002 Державні санітарні норми і правила при роботі з джерелами електромагнітних полів, затверджені наказом Міністерства охорони здоров'я України від 18.12.2002 № 476, зареєстровані в Міністерстві юстиції України 13.03.2003 за № 203/7524.
- СОУ-Н МПЕ 40.1.20.509:2005 Експлуатація силових кабельних ліній напругою до 35 кВ. Інструкція, затверджена наказом Міністерства палива та енергетики України від 15.02.2005 № 77.
- ГНД 34.50.501-2003 Експлуатація стаціонарних свинцево-кислотних акумуляторних батарей. Типова інструкція, затверджена наказом Міністерства палива та енергетики України від 16.12.2003 № 755.
- ГКД 34.35.511.2002 Правила підключення електроустановок споживачів до спеціальної автоматики відключення навантаження (САВН), затверджені наказом Міністерства палива та енергетики України від 29.07.2002 № 449, зареєстровані в Міністерстві юстиції України 15.08.2002 за № 667/6955.

ВИСНОВОК

В дисертаційній роботі було встановлено параметри комплексної електростанції для забезпечення власних потреб споживача на основі відновлюваних джерел енергії.

1. Було написано код програми, яка за вказаними графіками покриття сонячної генерації та графіком навантаження споживача вираховує енергетичний баланс всієї системи та мінімально необхідну потужність дизель-генератора для забезпечення надійного покриття споживання. Таким чином в схемі, де генератор працює напряду на споживача розрахунковим шляхом було вираховано, що мінімально необхідною потужністю генератора буде така потужність, щоб в будь-який момент часу забезпечити повне навантаження всієї системи.

2. За результатами розрахунку енергетичного балансу всієї системи, шляхом підбору потужності кожного зі складових елементів даної системи було визначено їх оптимальне співвідношення, при якому станція буде забезпечувати необхідну надійність покриття споживання за найкращих економічних умов. Тобто визначення оптимальної потужності базувалося на вартості всього обладнання станції (постійна складова) та вартості витрат на роботу станції (експлуатаційна складова), для досягнення найшвидшої вигоди в установленні такої електростанції.

3. На базі вищезазначених розрахунків було сформовано кошторис всієї автономної сонячної електростанції з акумуляторними батареями та дизель-генератором, яка склала 1 млн. 600 тис. грн. Було вираховано час окупності такої автономної станції у порівнянні з станцією виключно на базі дизель-генератора, де були взяті до уваги як основні витрати, так і експлуатаційні витрати, таким чином окупність станції складає 15 місяців, що в даному випадку відповідає трьом сезонам роботи літнього котеджу.

Як підсумовуючий висновок дисертаційної роботи було створено стартап проєкт, за основу якого береться програма для розрахунку типової автономної електростанції з використанням відновлюваних джерел енергії,

системи акумулювання енергії та резервного джерела живлення, що базується на запропонованих у цій роботі розрахунках. Такий проєкт має на меті узагальнити та спростити розрахунок подібної станції до задання вхідних даних, а саме графіку генерації та споживання, де на виході буде отримано найбільш оптимальне співвідношення та термін окупності такої станції, з урахуванням вартості обладнання, яке буде запропоновано з переліку сформованого в базі даної програми.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Відновлювані джерела енергії / За заг. ред. С.О. Кудрі. – Київ: Інститут відновлюваної енергетики НАНУ, 2020. – 392 с.
2. Атлас енергетичного потенціалу відновлюваних джерел енергії України / за заг. ред. С.О. Кудрі. – Київ: Інститут відновлюваної енергетики НАН України, 2020. – 82 с. [ЕЛЕКТРОННИЙ РЕСУРС]. – РЕЖИМ ДОСТУПУ: <https://www.ive.org.ua/wp-content/uploads/atlas.pdf>
3. Renewable Energy Market Update. Outlook for 2023 and 2024 / International Energy Agency, 2023. 87 с. [ЕЛЕКТРОННИЙ РЕСУРС]. – РЕЖИМ ДОСТУПУ: https://iea.blob.core.windows.net/assets/63c14514-6833-4cd8-ac53-f9918c2e4cd9/RenewableEnergyMarketUpdate_June2023.pdf
4. EU Market Outlook. For Solar Power 2023-2027 / SolarPower Europe, 2023. – 136 с. [ЕЛЕКТРОННИЙ РЕСУРС]. – РЕЖИМ ДОСТУПУ: https://api.solarpowereurope.org/uploads/Solar_Power_Europe_EU_Market_Outlook_2023_v03_deca570a83.pdf
5. Ukraine's renewable energy sector before, during and after the war / Andriy Konechenkov, Volodymyr Omelchenko - Razumkov Centre, 2022. [ЕЛЕКТРОННИЙ РЕСУРС]. – РЕЖИМ ДОСТУПУ: <https://razumkov.org.ua/en/articles/ukraines-renewable-energy-sector-before-during-and-after-the-war>
6. Solar Energy. Fundamentals, Technology, and Systems / Klaus Jäger, Olindo Isabella, Arno H.M. Smets, René A.C.M.M. van Swaaij, Miro Zeman. - Delft University of Technology, 2014. – 420 с.
7. Solar Thermal Systems: Components and Applications / Soteris A. Kalogirou. - Comprehensive Renewable Energy (Second Edition), 2022. [ЕЛЕКТРОННИЙ РЕСУРС]. – РЕЖИМ ДОСТУПУ: <https://www.sciencedirect.com/referencework/9780128197349/comprehensive-renewable-energy>
8. Математичні задачі у відновлюваної енергетиці: розрахунково-графічна робота [Електронний ресурс]: навч. посіб. для студ. спеціальності 141

«Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» / КПІ ім. Ігоря Сікорського /уклад.: О.Ю. Гаєвський – Електронні текстові дані (1 файл: 1,72 Мбайт). – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2023. – 28 с.

9. The Ultimate Guide to Semiconductor Junctions / Akshay VR Republic Of Solar, 2022. [ЕЛЕКТРОННИЙ РЕСУРС]. – РЕЖИМ ДОСТУПУ: <https://arka360.com/ros/semiconductor-junctions/>

10. Device physics and device integration of two-dimensional heterostructures / Chandan Kumar, ... Satyabrata Jit - 2D Nanoscale Heterostructured Materials, 2020. [ЕЛЕКТРОННИЙ РЕСУРС]. – РЕЖИМ ДОСТУПУ: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/B9780128176788000075>

11. Solar Energy / C.B.Honsberg and S.G.Bowden - Photovoltaics Education Website, 2019. [ЕЛЕКТРОННИЙ РЕСУРС]. – РЕЖИМ ДОСТУПУ: <https://www.pveducation.org/>

12. Photonic Properties of Devices Based on Multicomponent Crystalline Compounds with Content (Si, Ge, Sn) / S.P. Danylchuk, O.V. Zamurujeva, V.E. Sakhnyuk, S.A. Fedosov – PHYSICS AND CHEMISTRY OF SOLID STATE, V. 22, № 3, 2021. с. 470-476.

13. Photovoltaics Reaching for the Shockley–Queisser Limit / Bruno Ehrler, Esther Alarcón-Lladó, Stefan W. Tabernig, Tom Veeken, Erik C. Garnett, and Albert Polman – Energy Focus, №5, 2020. с. 3029-3033. [ЕЛЕКТРОННИЙ РЕСУРС]. – РЕЖИМ ДОСТУПУ: <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acsenergylett.0c01790>

14. Most powerful solar panels 2023 / Jason Svarc Clean Energy Reviews, 2023. [ЕЛЕКТРОННИЙ РЕСУРС]. – РЕЖИМ ДОСТУПУ: <https://www.cleanenergyreviews.info/blog/most-powerful-solar-panels>

15. Thin Film Solution Processable Perovskite Solar Cell / Mayur Jagdishbhai Patel, Himangshu Baishya, Ritesh Kant Gupta, Rabindranath Garai and Parameswar Krishnan Iyer - Recent Advances in Multifunctional Perovskite Materials, 2022. [ЕЛЕКТРОННИЙ РЕСУРС]. – РЕЖИМ ДОСТУПУ: <https://www.intechopen.com/chapters/82792>

16. Perovskites and Perovskite Solar Cells: An Introduction / Dr. Mary O'Kane – Ossila enabling science, 2023. [ЕЛЕКТРОННИЙ РЕСУРС]. – РЕЖИМ ДОСТУПУ: <https://www.ossila.com/pages/perovskites-and-perovskite-solar-cells-an-introduction>

17. Advanced DC–DC converter topologies for solar energy harvesting applications: a review / Tole Sutikno, Ahmad Saudi Samosir, Rizky Ajie Aprilianto, Hendril Satrian Purnama, Watra Arsadiando, Sanjeevikumar Padmanaban - Clean Energy, Volume 7, Issue 3, June 2023, Pages 555–570. [ЕЛЕКТРОННИЙ РЕСУРС]. – РЕЖИМ ДОСТУПУ: <https://academic.oup.com/ce/article/7/3/555/7156568>

18. Перспективи та розвиток літєвих акумуляторів в Україні / Багач Р. В., Кальченко О. О. – Всеукраїнська науково практична конференція «Світові тенденції ресурсозбереження на електричному транспорті», 2023. [ЕЛЕКТРОННИЙ РЕСУРС]. – РЕЖИМ ДОСТУПУ: https://science.kname.edu.ua/images/dok/konferentsii/2023/Tezy_2023/Tezy_ET_23-25_10_23.pdf#page=31

19. Використання водневих паливних комірок, як незалежних джерел електричної та теплової енергії / Володимирчук О.А. - II науково-технічна конференція магістрантів ІЕЕ «Сталий розвиток енергетики. Сучасні системи забезпечення електроенергією», 2019. [ЕЛЕКТРОННИЙ РЕСУРС]. – РЕЖИМ ДОСТУПУ: https://ela.kpi.ua/bitstream/123456789/50214/1/Zbirnyk_2019.pdf#page=18

20. Редокс проточні накопичувачі енергії / Біляєва, А. С. - Технічне забезпечення інноваційних технологій в агропромисловому комплексі: матеріали I Міжнар. наук.-практ. конференції молодих учених, 2021. с. 168. [ЕЛЕКТРОННИЙ РЕСУРС]. – РЕЖИМ ДОСТУПУ: <http://elar.tsatu.edu.ua/handle/123456789/13391>

21. Стійкість комбінованої системи накопичення енергії на основі суперконденсатора та акумуляторної батареї / Бондаренко О. Ф., Кажушко Ю. В., Карбівська Т. О., Желязков Є. О., Сафронов П. С. – Електротехніка і

електромеханіка, 2020. [ЕЛЕКТРОННИЙ РЕСУРС]. – РЕЖИМ ДОСТУПУ: <https://cyberleninka.ru/article/n/stiykist-kombinovanoyi-sistemi-nakopichennya-energiyi-na-osnovi-superkondensatora-ta-akumulyatornoui-batareyi>

22. Автономна гідроакумуюча електростанція / В. М. Головка, Р. Ю. Семененко. - Енергетика і автоматика, №2, 2023. [ЕЛЕКТРОННИЙ РЕСУРС]. – РЕЖИМ ДОСТУПУ: <https://journals.nubip.edu.ua/index.php/Energiya/article/view/energiya2%2866%29.2023.116>

23. Review of Hydro-Pneumatic Accumulator Models for the Study of the Energy Efficiency of Hydraulic Systems / Ryszard Dindorf, Jakub Takosoglu, Piotr Wos. - Energies 2023. [ЕЛЕКТРОННИЙ РЕСУРС]. – РЕЖИМ ДОСТУПУ: <https://www.mdpi.com/1996-1073/16/18/6472>

24. A Review of Flywheel Energy Storage System Technologies / Kai Xu, Youguang Guo, Gang Lei, Jianguo Zhu. - Energies 2023. [ЕЛЕКТРОННИЙ РЕСУРС]. – РЕЖИМ ДОСТУПУ: <https://www.mdpi.com/1996-1073/16/18/6462>

25. Superconducting magnetic energy storage and superconducting self-supplied electromagnetic launcher / Jérémie Cicéron, Arnaud Badel, Pascal Tixado. – European Physical Journal: Applied Physics, 2017. [ЕЛЕКТРОННИЙ РЕСУРС]. – РЕЖИМ ДОСТУПУ: <https://hal.science/hal-02017489/document>

26. Системи акумулювання електроенергії, аналіз можливостей та їх поєднання для застосування в енергосистемі / А. В. Івахнов, О. П. Лазуренко, С. О. Федорчук. - Вісник Національного технічного університету «ХП». Серія: Енергетика надійності та енергоефективності, № 10 (1286) 2018. [ЕЛЕКТРОННИЙ РЕСУРС]. – РЕЖИМ ДОСТУПУ : <https://repository.kpi.kharkov.ua/server/api/core/bitstreams/e44c0733-1a36-48bf-a2f3-7e3cd5abf58e/content>

27. Особливості комбінованих енергосистем з відновлюваними джерелами енергії: монографія / М. П. Кузнєцов. — Київ: ІВЕ, 2022. — 142 с. . [ЕЛЕКТРОННИЙ РЕСУРС]. – РЕЖИМ ДОСТУПУ: https://www.ive.org.ua/wp-content/uploads/Kuznetzov_monografy_PRINT.pdf

28. Забезпечення балансу енергії в локальній системі з відновлюваною генерацією / М. П. Кузнєцов, О. Лисенко. - Науково-прикладний журнал Відновлювана енергетика «Відновлювана енергетика» №1, 2023. . [ЕЛЕКТРОННИЙ РЕСУРС]. – РЕЖИМ ДОСТУПУ:

<https://ve.org.ua/index.php/journal/article/view/380>

29. Determination of the Optimal Algorithm for the Operation of a Hybrid Power System with a Regulating Generator / Kuznetsov N., Lysenko O. - Problemele energeticii regionale, №3, 2022.

30. Оптимальне планування гібридної енергосистеми при різних тарифах на електроенергію / М.П. Кузнєцов, О.О. Кармазін. - Науково-прикладний журнал Відновлювана енергетика «Відновлювана енергетика» №3, 2023. . [ЕЛЕКТРОННИЙ РЕСУРС]. – РЕЖИМ ДОСТУПУ:

<https://ve.org.ua/index.php/journal/article/view/351>

31. Оптимальне регулювання локальної енергосистеми з відновлюваними джерелами енергії / Микола Петрович Кузнєцов, Ольга Валеріївна Лисенко, Олександр Анатолійович Мельник. – Енергетика: надійність та енергоефективність, №1, 2021. [ЕЛЕКТРОННИЙ РЕСУРС]. – РЕЖИМ ДОСТУПУ: <http://ereee.khpi.edu.ua/article/view/235961>

ДОДАТКИ

Додаток А Код програми

```
clc
close all
clear all

%Зчитування даних
for i = 1:31
    data = xlsread(string(i)+'.07..xlsx');
    Consumption(:,i)=data(:,1)./15;
    Generation(:,i)=(data(:,2)./30000);
end

Consumption=Consumption*10;
Generation=Generation*20;

figure (1)
grid on, hold on
h=((1:288).*5./60);
plot(h,Consumption(:,16)), plot(h, Generation(:,16))
legend('Споживання','Генерація')
xlabel('Год')
ylabel('Генерація / споживання, кВт')

%цикл - розрахунок
%288 рядочків, 31 стовпчик

u=Consumption; %матриця навантажень, кВт
s=Generation; %матриця сонячної генерації
C_max=0; %кВт*год
C_ch_max=.5*C_max/1; %максимальна допустима потужність зарядки/розрядки системи АКБ, кВт
C=C_max;
g_min=0; %мінімально необхідна потужність генератора, кВт
GENERATOR_RESERVE=zeros(31,288);
for j=1:31
    for i=1:288
        c_start(i,j)=C;
        p(i,j)=s(i,j)-u(i,j); %розрахунок недостачі/надлишку потужності у даному 5-хвилинному інтервалі, кВт
        if abs(p(i,j))<=C_ch_max %перевірка на максимально допустимі потужності розрядки/зарядки
            if C+p(i,j)*5/60 >= .2*C_max && C+p(i,j)*5/60 <=C_max
                C=C+p(i,j)*5/60; %розрахунок наявної фактичної кількості енергії в системі АКБ
                %після закінчення 5-хвилинного інтервалу
                %У цьому випадку генератор не задіюється
            elseif C+p(i,j)*5/60 < .2*C_max
                GENERATOR_RESERVE(i,j)=abs(p(i,j))-(C-.2*C_max)*5/60;
            else
                C=C_max;
            end
        else
            %наступний блок спрацює у разі, якщо акумулятор можливо
            %розрядити/зарядити максимальними струмами і при цьому його
            %заряд буде в межах C[20%;100%]
            if C+sign(p(i,j))*C_ch_max*5/60 >= .2*C_max &&
                C+sign(p(i,j))*C_ch_max*5/60 <=C_max
                if p(i,j)<0
```

```

        GENERATOR_RESERVE(i,j)=abs(p(i,j))-C_ch_max;
    end
    C=C+sign(p(i,j))*C_ch_max*5/60;
elseif p(i,j) <= 0 && C+sign(p(i,j))*C_ch_max*5/60 < .2*C_max
    C=.2*C_max;
    GENERATOR_RESERVE(i,j)=abs(p(i,j));
elseif p(i,j) >= 0 && C+sign(p(i,j))*C_ch_max*5/60 < .2*C_max
    C=C+sign(p(i,j))*C_ch_max*5/60;
else
    C=C_max;
end
end
c_end(i,j)=C;
fact_C(i,j)=C;
end
end
c=(c_end-c_start)./5.*60; %потужність зміни енергії в АКБ
for i=1:31
    figure (i+1)
    grid on
    hold on
    h=((1:288).*5./60);
    plot(h,p(:,i),'o')
    plot(h,c(:,i))
    plot(h,-1.*GENERATOR_RESERVE(:,i))
    plot(h,fact_C(:,i))
    legend('Баланс (нехватка/надлишок)', 'Покриття за доп. АКБ', "Покриття за доп.
генератора", 'Фактична ємність, наявна у акумуляторі, кВт·год')
    xlabel('Год')
    ylabel('Виробіток / споживання, кВт')
end

disp('МІНІМАЛЬНА ПОТУЖНІСТЬ ГЕНЕРАТОРА')
%max(GENERATOR_RESERVE)

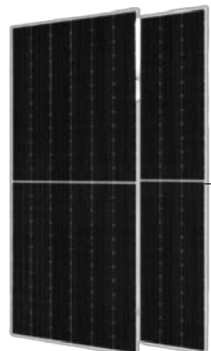
for i=1:288
    for j=1:31
        if p(i,j)-c(i,j)<0
            genuse(i,j)=p(i,j)-c(i,j);
        end
    end
end
end

%Вироблена енергія генератором протягом дня
GENUSE=abs(sum(genuse)*5/60);
DAY=1:31;
disp(table(sum(GENUSE(:))))
disp(table(DAY(:),GENUSE(:)))
figure (33)
hold on
grid on
plot(GENUSE,'r','LineWidth',1.5)
legend('Добовий виробіток генератором')
xlabel('День')
ylabel('Виробіток, кВт·год')

```

Додаток Б Схематичне зображення взаємозв'язків елементів комбінованої системи

ФЕМ
JA SOLAR JAM72S30-555/GR



Інвертор
SOFAR HYD 20KTL-3PH



АКБ
SOFAR BTS 5K



Смарт мітер
CHINT DTSU666



Генератор
SDMO-K16H Adriatic
(Kohler)



Навантаження

Додаток В Схема приєднань електричного обладнання системи

