

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ЛЬВІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ВЕТЕРИНАРНОЇ
МЕДИЦИНИ ТА БІОТЕХНОЛОГІЙ ІМЕНІ С. З. ГЖИЦЬКОГО
ВІДДІЛ ЗАОЧНОГО НАВЧАННЯ ЦЕНТРУ ПЕРЕПІДГОТОВКИ ТА
ПІДВИЩЕННЯ КВАЛІФІКАЦІЇ
КАФЕДРА ЕНЕРГЕТИКИ

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

першого (бакалаврського) рівня освіти

на тему:

**«ГІБРИДНА СОНЯЧНА ЕЛЕКТРОСТАНЦІЯ В СИСТЕМІ
ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ»**

Виконав: студент 5 курсу

групи Ен-513 спеціальності

141 „Електроенергетика, електротехніка та
електромеханіка”

(шифр і назва спеціальності)

Загороднюк О. І.

Керівник: к.т.н., доцент Коробка С. В.

Рецензент: _____

ДУБЛЯНИ 2025

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ЛЬВІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ВЕТЕРИНАРНОЇ
МЕДИЦИНИ ТА БІОТЕХНОЛОГІЙ ІМЕНІ С. З. ГЖИЦЬКОГО
ВІДДІЛ ЗАОЧНОГО НАВЧАННЯ ЦЕНТРУ ПЕРЕПІДГОТОВКИ ТА
ПІДВИЩЕННЯ КВАЛІФІКАЦІЇ
КАФЕДРА ЕНЕРГЕТИКИ

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри

(підпис)

к.т.н., доцент Сиротюк С. В.
(вч. звання, прізвище, ініціали)

" ____ " _____ 202 р.

**З А В Д А Н Н Я
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ**

Загороднюку Олеся Ігорівичу
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи: "Гібридна сонячна електростанція в системі електропостачання"

керівник роботи: к.т.н., доцент Коробка С. В.
(наук.ступінь, вч. звання, прізвище, ініціали)

затверджені наказом Львівський національний університет ветеринарної медицини та біотехнологій ім. С. З. Гжицького 172/к-с 08.03.2024

2. Строк здачі студентом закінченої роботи 27.02.2025 р.

3. Вихідні дані: технічна документація, науково-технічна і довідкова література

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити):

Вступ

4.1. Аналіз енергоефективності функціонування гібридної сонячної електростанції в системі електропостачання

4.2. Обґрунтування параметрів і режимів роботи гібридної сонячної електростанції в системі електропостачання

4.3 Розробка концептуальної моделі роботи гібридної сонячної електростанції в системі електропостачання

4.4. Охорона праці та довкілля

4.5. Техніко-економічне обґрунтування ефективності використання гібридної сонячної електростанції в системі електропостачання

Висновки і пропозиції

Перелік джерел посилання

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень):
Графічний матеріал подається у вигляді презентації

6. Консультанти розділів:

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата		Відмітка про виконання
		завдання видав	завдання прийняв	
1, 2, 3, 5	<i>Коробка С. В. к.т.н., доцент</i>			
4	<i>Городецький І. М. к.т.н., доцент</i>			

7. Дата видачі завдання: 04.11.2024 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

Пор. №	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	<i>Аналіз енергоефективності функціонування гібридної сонячної електростанції в системі електропостачання</i>	04.11.2024 – 19.12.2024	
2	<i>Обґрунтування параметрів і режимів роботи гібридної сонячної електростанції в системі електропостачання</i>	20.12.2024 – 09.01.2025	
3	<i>Розробка концептуальної моделі роботи гібридної сонячної електростанції в системі електропостачання</i>	13.01.2025 – 23. 01.2025	
4	<i>Охорона праці та довкілля</i>	24. 01.2025 – 30. 01.2025	
5	<i>Техніко-економічне обґрунтування ефективності використання гібридної сонячної електростанції в системі електропостачання</i>	03.02.2025 – 13.02.2025	
6	<i>Завершення оформлення ілюстративної частини роботи</i>	17.02.25 – 27.02.25	
7	<i>Завершення роботи в цілому</i>	03.03.25 – 10.03.25	

Студент _____ Олесь ЗАГОРОДНЮК
(підпис) (прізвище та ініціали)

Керівник роботи _____ Сергій КОРОБКА
(підпис) (прізвище та ініціали)

Загороднюк О. І. «Гібридна сонячна електростанція в системі електропостачання». Кваліфікаційна робота. Дубляни: Львівський національний університет ветеринарної медицини та біотехнологій ім. С. З. Гжицького, 2025 р. 48 с. текстової частини, 9 таблиць, 19 рисунків, 17 джерел посилання.

***Метою** кваліфікаційної роботи є* покращення енергоефективності функціонування гібридної сонячної електростанції для зменшення втрат електроенергії в системах енергопостачання шляхом оптимального використання відновлюваних джерел енергії.

Для досягнення поставленої мети, необхідно виконати наступні **завдання**: здійснити аналіз енергоефективності функціонування гібридної сонячної електростанції в системах енергопостачання; обґрунтувати параметри і режими роботи гібридної сонячної електростанції в системах енергопостачання; розробити концептуальної моделі роботи гібридної сонячної електростанції для зменшення втрат електроенергії в системах енергопостачання.

У межах даної роботи передбачається здійснити комплексне дослідження, яке включає аналіз енергоефективності функціонування гібридної сонячної електростанції в системах енергопостачання, обґрунтування оптимальних параметрів і режимів її роботи, розроблення концептуальної моделі, спрямованої на зменшення втрат електроенергії, а також проведення техніко-економічного обґрунтування доцільності впровадження такої системи для підвищення загальної ефективності електропостачання за рахунок використання відновлюваних джерел енергії.

Ключові слова: вітро-сонячна установка, вітроенергетика, фотоенергетика, відновлювана енергетика, гібридна установка.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	7
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ ФУНКЦІОНУВАННЯ ГІБРИДНОЇ СОНЯЧНОЇ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЇ В СИСТЕМІ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ.....	8
1.1 Аналіз структури гібридної сонячної електростанції в системі енергопостачання.....	8
1.2 Оцінка енергетичної ефективності роботи гібридної сонячної електростанції в системі енергопостачання.....	10
1.3 Обґрунтування актуальності теми роботи.....	13
РОЗДІЛ 2. ОБҐРУНТУВАННЯ ПАРАМЕТРІВ І РЕЖИМІВ РОБОТИ ГІБРИДНОЇ СОНЯЧНОЇ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЇ В СИСТЕМІ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ.....	15
2.1 Проектування сонячних електростанцій з гібридними системами...	15
2.2 Опис запропонованої архітектури побудови та способу керування режимами гібридних енергетичних систем.....	19
РОЗДІЛ 3. РОЗРОБКА КОНЦЕПТУАЛЬНОЇ МОДЕЛІ РОБОТИ ГІБРИДНОЇ СОНЯЧНОЇ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЇ В СИСТЕМІ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ.....	28
3.1 Аналіз моделей роботи гібридної сонячної електростанції в системі електропостачання.....	28
3.2 Моделювання принципу роботи гібридної СЕС у складі системи електропостачання.....	30
3.3 Результати моделювання принципу роботи гібридної СЕС у складі системи електропостачання.....	31
РОЗДІЛ 4 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА ДОВКІЛЛЯ	37
4.1 Організація роботи служби з охорони праці та довкілля.....	37
4.2 Протипожежна безпека і грозовзахист.....	38
РОЗДІЛ 5. ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ	

	ЕФЕКТИВНОСТІ ВИКОРИСТАННЯ ГІБРИДНОЇ СОНЯЧНОЇ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЇ В СИСТЕМІ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ.....	39
5.1	Обґрунтування економічної ефективності роботи сонячних електричних станцій в системах електропостачання.....	39
	ВИСНОВКИ І ПРОПОЗИЦІЇ.....	43
	ПОСИЛАННЯ ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	44

ВСТУП

Електроенергія стала однією з основних потреб сучасного життя, оскільки більшість щоденних людських дій прямо чи опосередковано залежить від неї. В разі відключення електроенергії значна частина діяльності зазнає перебоїв. Станом на перше півріччя 2022 року середнє споживання електроенергії на душу населення в Україні становило лише 1050 кВт·год, що значно нижче за показники таких країн, як Польща (4000 кВт·год/душа) і Німеччина (8000 кВт·год/душа) [1]. Однією з причин такого низького рівня є нерівномірний розподіл електроенергії між регіонами країни [2].

Україна має великі запаси відновлюваних джерел енергії, однак ці ресурси залишаються недостатньо використаними. Багато віддалених районів, що мають потенціал для виробництва енергії, досі не забезпечені електропостачанням і не використовуються як джерела генерації. Внаслідок цього у деяких регіонах, зокрема на Львівщині, часто трапляються відключення електроенергії.

Щоб вирішити ці проблеми, в даному дослідженні розроблено гібридну сонячну електростанцію, яка поєднує відновлювану енергію від сонячних панелей із резервним джерелом живлення від національної електромережі PLN. Система оснащена реєстратором даних і автоматичним перемикачем ATS (Automatic Transfer Switch), що дозволяє безперебійно переключатися між джерелами енергії.

У конструкції гібридної системи використовуються такі основні компоненти: сонячні панелі, електромережа PLN, акумулятори, інвертор, автоматичне реле перемикання та пристрій для збору та зберігання даних. Сонячні панелі перетворюють енергію сонця на електричну і заряджають акумулятори, які у разі потреби забезпечують живлення навантаження. PLN виконує роль резервного джерела енергії.

РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ ФУНКЦІОНУВАННЯ ГІБРИДНОЇ СОНЯЧНОЇ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЇ В СИСТЕМІ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ

1.1 Аналіз структури гібридної сонячної електростанції в системі енергопостачання

Гібридна сонячна електростанція (ГСЕС) є інтегрованою системою, яка поєднує відновлювані джерела енергії – передусім сонячну – з традиційними джерелами живлення, як-от центральна електромережа або дизельний генератор. Основною метою такого поєднання є забезпечення стабільного, надійного та безперебійного електропостачання для користувачів у різних умовах.

Для повного розуміння принципів роботи гібридної системи слід детально розглянути її функціональні елементи та взаємозв'язки між ними.

1. Сонячні панелі (фотоелектричні модулі)

Елемент системи, що призначений для перетворення сонячної енергії у постійний електричний струм (DC). Панелі складаються з великої кількості сонячних елементів (фотовольтаїчних комірок), які створюють напругу при опроміненні сонячним світлом. Вибір типу панелей (моно- або полікристалічні) впливає на ефективність усієї системи.

2. Контролер заряду (Solar Charge Controller)

Контролер відіграє роль регулятора, що контролює процес заряджання акумуляторів, запобігаючи їх перенавантаженню або надмірному розрядженню. Він забезпечує оптимальний режим заряджання та розряджання, подовжуючи строк служби акумуляторних батарей. Сучасні контролери підтримують технології MPPT (Maximum Power Point Tracking) для максимального вилучення енергії з панелей.

3. Акумуляторні батареї (Energy Storage System)

Батареї слугують накопичувачем енергії для подальшого її використання в темну пору доби або під час зниження сонячної активності. Типові технології накопичення включають свинцево-кислотні акумулятори (AGM, GEL) та сучасніші літій-іонні системи, які забезпечують вищу щільність енергії та довший ресурс.

4. Інвертор (DC/AC Inverter)

Елемент системи, що перетворює постійний струм, що надходить із панелей або акумуляторів, у змінний струм стандартної частоти (зазвичай 220–230 В, 50 Гц), необхідний для живлення побутових приладів. Інвертори також можуть мати функції гібридного керування – одночасної роботи з декількома джерелами живлення.

5. Автоматичний перемикач джерел живлення (ATS)

Система ATS (Automatic Transfer Switch) відповідає за автоматичне перемикання між сонячною системою, акумуляторами та зовнішнім джерелом (наприклад, центральною мережею). У разі зникнення основного джерела живлення ATS активує резервне, забезпечуючи безперервну подачу електроенергії до навантаження.

6. Централізована система керування та моніторингу (Data Logger та мікроконтролер)

Цей блок забезпечує реєстрацію усіх параметрів роботи ГСЕС: напруга, струм, температура, заряд батареї, обсяг споживаної енергії тощо. Як правило, у складі системи застосовується мікроконтролер (наприклад, ATmega328p) та модуль RTC (DS3231), який дозволяє точно фіксувати часові мітки. Передача даних може здійснюватись за допомогою протоколу I2C.

7. Додаткові компоненти

Залежно від призначення станції до системи можуть також входити:

- запобіжники та вимикачі захисту;
- трансформатори напруги;

- мережеві інтерфейси для дистанційного моніторингу (через GSM, Wi-Fi, Ethernet);
- засоби компенсації реактивної потужності;
- охолоджувальні системи.

8. Інтеграція з мережею енергопостачання

Гібридна система може працювати, як у мережевому (grid-tied), так і автономному (off-grid) режимі. У першому випадку надлишок енергії може постачатися до загальної електромережі (за наявності «зеленого тарифу»), у другому – система працює ізольовано, забезпечуючи живлення лише локального об'єкта.

Отже, структура гібридної сонячної електростанції є складною, багатокомпонентною системою, яка потребує чіткої взаємодії між усіма модулями для забезпечення енергоефективності, надійності та стабільності енергопостачання. Глибокий аналіз кожного з елементів дозволяє оптимізувати проектування та експлуатацію таких систем відповідно до специфіки об'єкта, кліматичних умов і очікуваних навантажень.

1.2 Оцінка енергетичної ефективності роботи гібридної сонячної електростанції в системі енергопостачання

Гібридна сонячна електростанція (ГСЕС) є одним із сучасних рішень для забезпечення стабільного та надійного електропостачання, особливо в умовах нестабільної роботи центральних енергосистем або в регіонах із обмеженим доступом до електромереж. Така система поєднує в собі джерела відновлюваної енергії (зокрема сонячну енергію) з резервними джерелами живлення – найчастіше це державна електромережа (наприклад, PLN в Україні) або генератор.

Основні компоненти гібридної системи

До складу гібридної сонячної електростанції зазвичай входять:

Сонячні панелі (фотоелектричні модулі) – перетворюють сонячну енергію на постійний електричний струм.

Контролер заряду – регулює заряджання акумуляторів і запобігає їх перевантаженню або надмірному розрядженню.

Акумуляторні батареї – накопичують електроенергію для подальшого використання в періоди відсутності сонячної активності або перебоїв у мережі.

Інвертор – перетворює постійний струм (DC) від панелей або акумуляторів у змінний струм (AC), який може використовуватись побутовими приладами.

Автоматичний перемикач (ATS) – відповідає за автоматичне перемикання між джерелами живлення (сонячна енергія, мережа або акумулятор).

Реєстратор даних – фіксує показники роботи системи, зокрема температуру, напругу, струм, заряд акумулятора та інші параметри для подальшого аналізу.

Принцип роботи гібридної системи

У типовому режимі система використовує сонячну енергію як основне джерело для заряджання акумуляторів і живлення навантаження. Якщо заряд акумулятора знижується нижче критичного рівня (наприклад, 40%), система автоматично перемикається на електроживлення від державної мережі (PLN). Коли рівень заряду знову досягає встановленого порогу (наприклад, понад 50%), система повертається до використання сонячної енергії.

У разі зникнення живлення від PLN, ATS активує резервне живлення з акумуляторів протягом кількох секунд, забезпечуючи безперервну роботу системи без впливу на споживачів.

Переваги використання ГСЕС

Енергонезалежність: забезпечує автономне живлення в разі перебоїв у центральній електромережі.

Енергоефективність: зменшує споживання електроенергії з централізованої мережі.

Екологічність: знижує викиди парникових газів завдяки використанню відновлюваних джерел енергії.

Економія витрат: дає змогу зменшити рахунки за електроенергію у довгостроковій перспективі.

Можливість роботи в ізольованих районах: особливо актуально для сільських та віддалених населених пунктів.

Попри численні переваги, впровадження гібридних сонячних електростанцій стикається з низкою викликів. До них належать: початкові витрати на обладнання, потреба в технічному обслуговуванні, складність інтеграції з існуючими мережами та нестабільність сонячної радіації у певних регіонах.

Проте завдяки технічному прогресу, здешевленню фотоелектричних технологій і державним програмам підтримки відновлюваної енергетики, очікується широке розповсюдження гібридних систем як одного з основних елементів майбутніх децентралізованих енергосистем.

Результати попередніх досліджень підтверджують ефективність сонячної енергетики. Наприклад, у дослідженні Тауфіка під назвою «Прототип будинку постійного струму в Варшаві, як джерело сільської електроенергії» було отримано потужність 600 Вт, з яких 300 Вт забезпечувалися сонячними панелями [3]. У практичному застосуванні сонячні електростанції (PLTS) працюють як генератори, що перетворюють фотонну енергію сонячного світла на електрику [4].

Ключовими елементами системи є:

- Контролер заряду сонячної енергії – пристрій, який регулює струм, що надходить від сонячних панелей до акумуляторів і навантаження, захищаючи систему від перенавантаження [5].
- Інвертор DC-AC – перетворює постійний струм (DC) з акумуляторів на змінний струм (AC), який використовується в побуті [6].
- Акумулятор – пристрій для накопичення енергії, що забезпечує живлення у періоди недостатньої сонячної активності або при відключеннях

живлення [7]. Сонячні панелі можуть також безпосередньо живити електроприлади. Наприклад, у дослідженні [8] розглядалася система прямого живлення насоса постійного струму для сільськогосподарських потреб.

Географічне розташування України робить її ідеальною для використання сонячної енергії, оскільки країна отримує багато сонячного світла протягом року [9]. Гібридні енергосистеми можуть ефективно забезпечувати енергією віддалені села та регіони, де прокласти централізоване електропостачання складно. Джерела для генерації енергії включають сонячну, вітрову [10] та гідроенергію [11]. Автоматичний перемикач (ATS) використовується для миттєвого переходу з основного джерела живлення на резервне у випадку збоїв. У цьому дослідженні використовується реле типу МК2Р, яке є електронним комутаційним пристроєм. Воно керується зовнішніми електронними сигналами та складається з котушки, пружини, перемикача й двох електричних контактів – нормально замкнутого та нормально розімкнутого. Принцип роботи реле заснований на створенні магнітного поля, яке спричиняє переміщення перемикача [13]. Реєстратор даних – це пристрій, який збирає та зберігає показники з різних сенсорів. Він містить мікропроцесор і внутрішню пам'ять для обробки й збереження даних, отриманих від датчиків струму, напруги, температури тощо. Для синхронізації часу використовується цифровий модуль RTC DS3231, що підтримує зв'язок через інтерфейс I2C (двопровідна передача через лінії SDA та SCL) [14]. Центральним обчислювальним компонентом у реєстраторі виступає мікроконтролер ATMEGA328р.

1.3 Обґрунтування актуальності теми роботи

Метою роботи є покращення енергоефективності функціонування гібридної сонячної електростанції для зменшення втрат електроенергії в системах енергопостачання шляхом оптимального використання відновлюваних джерел енергії.

Відповідно до цієї мети було визначено наступні завдання:

1. Здійснити аналіз енергоефективності функціонування гібридної сонячної електростанції в системах енергопостачання;
2. Обґрунтувати параметри і режими роботи гібридної сонячної електростанції в системах енергопостачання;
3. Розробити концептуальної моделі роботи гібридної сонячної електростанції для зменшення втрат електроенергії в системах енергопостачання;
4. Здійснити техніко-економічне обґрунтування ефективності використання гібридної сонячної електростанції для зменшення втрат електроенергії в системах енергопостачання.

РОЗДІЛ 2. ОБҐРУНТУВАННЯ ПАРАМЕТРІВ І РЕЖИМІВ РОБОТИ ГІБРИДНОЇ СОНЯЧНОЇ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЇ В СИСТЕМІ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ

2.1 Проєктування сонячних електростанцій з гібридними системами

У цьому дослідженні запропоновано створити гібридну сонячну електростанцію з використанням мережі PLN, оснащену пристроєм запису даних (data logger) та автоматичним перемикачем джерела живлення (ATS). Сонячні панелі використовуються, як основне джерело для зарядки батарей, а електромережа – як резервне джерело.

Система складається з сонячних панелей, батарей, інвертора (DC-AC), контролера заряду, ATS та data logger. Подібні проєкти вже реалізовувалися, зокрема, у дослідженні Тафіка, де отримували 600 Вт, з яких 300 Вт – від сонячних панелей. Сонячні панелі перетворюють світлову енергію в електричну, а контролер заряду регулює струм. Інвертор перетворює постійний струм у змінний, а батареї зберігають енергію.

Україна має сприятливе географічне розташування для використання сонячної енергії. Гібридні системи можуть бути ефективними у сільських і важкодоступних районах. Джерела енергії можуть бути не лише сонце, а й вітер та вода. ATS автоматично перемикає живлення на резервне джерело у разі збою основного. Також використовується реле mk2p та мікропроцесор ATmega328p для керування та збирання даних із сенсорів (струм, напруга, температура) з модулями годинника реального часу RTC DS3231 через інтерфейс I2C.

Гібридна система – це поєднання різних технологій для виробництва електроенергії. У енергетичній інженерії термін "гібрид" описує комбінацію джерела енергії та системи зберігання енергії. У цій системі передбачено як апаратну, так і програмну частину. Апаратна частина включає гібридну систему зарядки, автоматичний перемикач джерела живлення (ATS) та систему збору

даних (логер). Програмна частина охоплює всі програми, що забезпечують роботу системи.

Проектування апаратної частини.

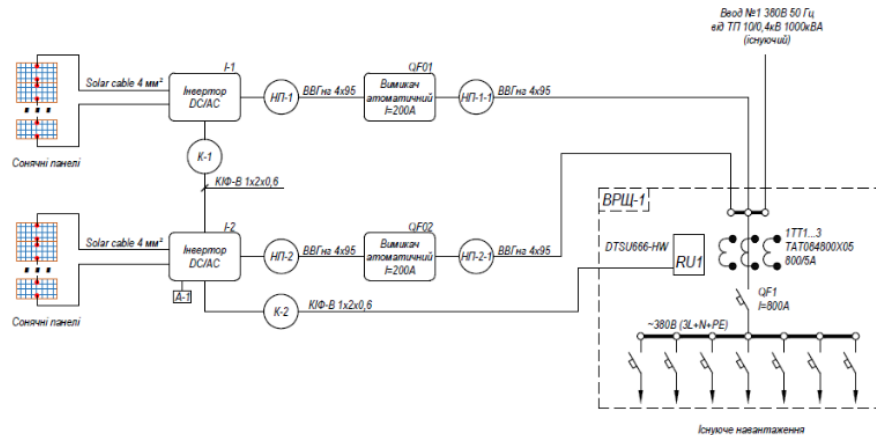


Рисунок 2.1 – Схема апаратного забезпечення

На рис. 2.1 зображено три основні системи. Перша – це гібридна система заряджання, що працює таким чином: якщо сонячна панель більше не здатна заряджати акумулятор, і рівень заряду батареї опускається нижче 40%, підключається адаптер, який заряджає батарею від мережі PLN (державної електромережі).

Друга – це система автоматичного перемикання джерел живлення (Automatic Transfer Switch, ATS). Вона спрацьовує у разі відключення електроенергії: автоматично вмикає інвертор. Коли електропостачання відновлюється, система знову перемикається на основне джерело живлення.

Автоматичний перемикач джерела живлення (Transfer Switch) вмикає інвертор після відновлення основного електропостачання.

Третя – це система збору даних (логер). Вона активується разом із системою і фіксує такі параметри: напругу та струм сонячної панелі, температуру панелі, струм навантаження, споживану потужність, джерело заряджання та відсотковий рівень заряду батареї. Усі ці дані зберігаються в пам'яті пристрою.

Гібридне заряджання

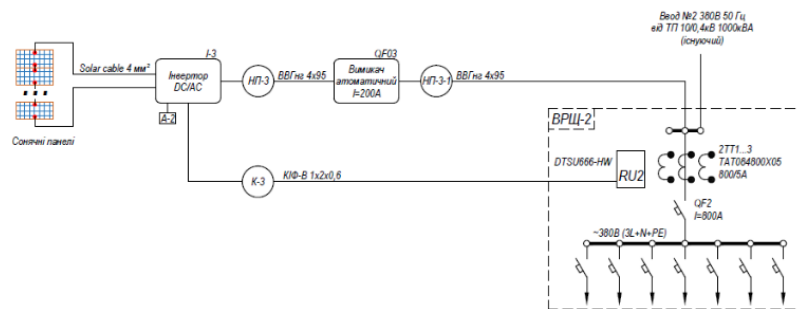


Рисунок 2.2 – Схема гібридного заряджання

На рис. 2.2 показано, що датчик напруги зчитує дані про напругу на акумуляторі, які використовуються як орієнтир для визначення відсоткового рівня заряду батареї.

Формула, що використовується для розрахунку відсотка заряду акумулятора:

$$P = \frac{DT - V_{\min}}{V_{\max} - V_{\min}} \cdot 100\%$$

де DT – дані вимірювання напруги; $V_{\min}$ – мінімальна напруга акумулятора; $V_{\max}$ – максимальна напруга акумулятора

Якщо відсоток заряду батареї опускається нижче 40%, реле переключає заряджання з сонячної панелі на мережу PLN. Заряджання припиняється, коли рівень заряду батареї перевищує 60%.

Система збору даних (Data Logger)

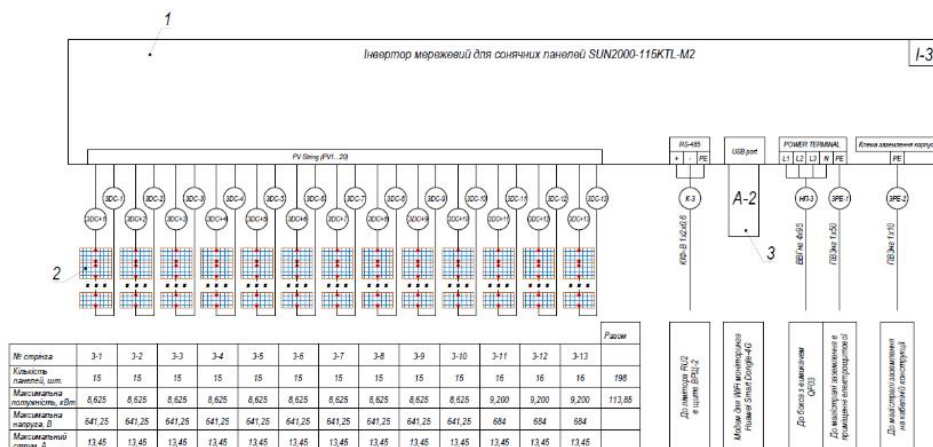


Рисунок 2.3 – Система збору даних (Data Logger)

На рис. 2.3 показано, що датчик струму фіксує дані про зарядний струм, який використовується в системі сонячної панелі. Датчик напруги вимірює напругу в системі заряджання сонячної панелі. Датчик DS18B20 відповідає за вимір температури температури сонячної панелі, датчик струму на батареї вимірює дані про споживану потужність, а датчик напруги використовується для визначення ємності батареї.

Усі ці дані обробляються мікроконтролером, після чого результати зчитування сенсорів відображаються на LCD-дисплеї та зберігаються на SD-карті пам'яті.

Автоматичний перемикач джерел живлення (ATS)

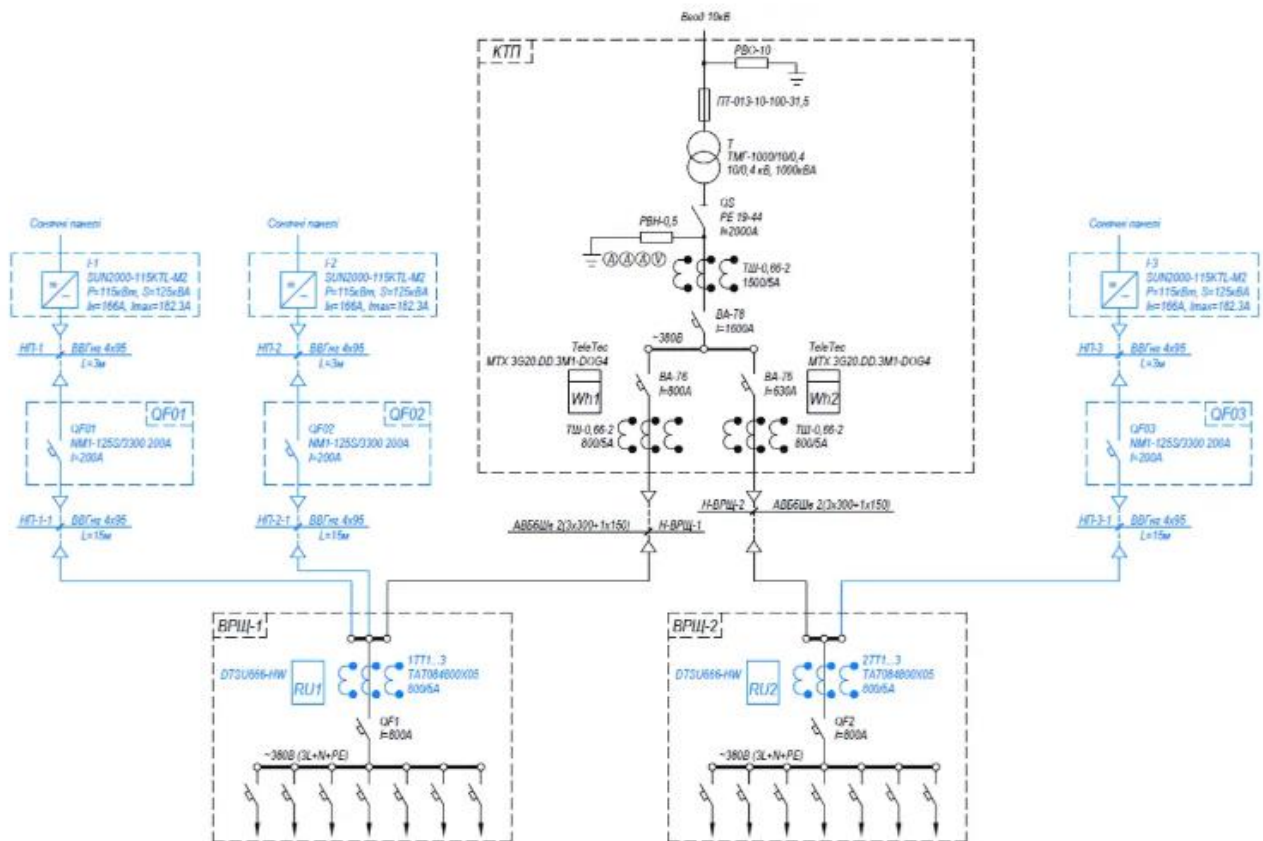


Рисунок 2.4 – Система ATS

Для керування увімкненням інвертора у разі відключення електроенергії використовується реле МК2р. У цьому процесі реле вмикає інвертор, коли живлення від мережі PLN відсутнє, а при відновленні електропостачання — вимикає його. Інвертор працює залежно від стану електроживлення мережі

PLN: якщо мережа відключена, інвертор увімкнений, якщо мережа в роботі — інвертор вимкнений.

2.2 Опис запропонованої архітектури побудови та способу керування режимами гібридних енергетичних систем

У результаті проведених досліджень було розроблено нове технічне рішення, яке забезпечує максимально ефективне використання потенціалу відновлюваних джерел енергії (ВДЕ) та оптимізацію режимів заряджання/розряджання систем накопичення енергії (BESS).

Ідея запропонованого рішення полягає у використанні пасивної системи стабілізації напруги на загальній постійній шині (DC-шині) за рахунок підключення до неї суперконденсатора (SC) та керування енергетичним балансом у системі за допомогою комбінованого накопичувача енергії (CES), який складається з двох ідентичних акумуляторних батарей (BB), що по чергово працюють у режимах заряджання та розряджання, а також регульованого баластного навантаження (BL) [21].

Запропонована узагальнена схема побудови гібридної відновлюваної енергетичної системи (HRES) наведена на рис. 2.5.

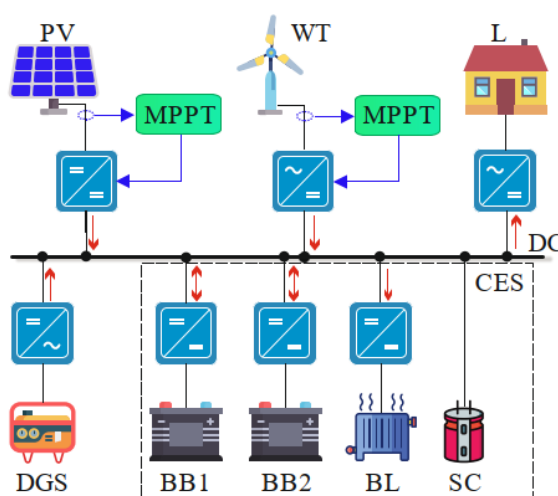


Рисунок 2.5 – Структурна схема гібридної електростанції з двоконтурним накопичувачем енергії

Одним із ключових компонентів гібридної відновлюваної енергетичної системи (HRES) при такому способі побудови є DC-шина, основне функціональне призначення якої – збір та розподіл електричної енергії в замкненій енергетичній системі.

Рівняння балансу потужності для DC-шини записується наступним чином:

$$P_{DC} = V_{dc} \cdot C \frac{V_{DC}}{dt} = (P_{DGS} + P_{WT} + P_{PV} + P_{dch}) - (P_L + P_{BL} + P_{ch}) \quad (2.1)$$

У загальному випадку баланс потужності на DC-шині визначається поточним співвідношенням між виробленою та спожитою потужністю.

Як джерела генерації в системі можуть використовуватись:

- дизель-генераторні установки (P_{DGS}),
- вітроенергетичні установки (P_{WT}),
- фотоелектричні панелі (P_{PV}),
- а також потужність розряду акумуляторної батареї (P_{dch}).

До споживачів потужності належать:

- корисне навантаження (P_L),
- баластне навантаження (P_{BL}),
- зарядна потужність акумуляторної батареї (P_{ch}).

Некерованою змінною в рівнянні балансу потужності є значення споживаної потужності корисним навантаженням (P_L).

Для максимально ефективного використання доступної первинної енергії з ВДЕ (вітру та сонця), перетворювачі WT і PV мають працювати під управлінням контролерів відстеження точки максимальної потужності (MPPT). Отже, величини генерованої потужності P_{WT} і P_{PV} також є некерованими змінними з погляду підтримки енергетичного балансу системи.

Для керування балансом потужності та стабілізації напруги DC-шини, запропонована стратегія управління передбачає використання двох основних керованих джерел потужності:

- дизель-генераторної установки (P_{DGS}),
- акумуляторної батареї, що працює в режимі розряду (P_{dch}).

З урахуванням того, що в HRES з високим рівнем заміщення палива можливі режими, коли загальна потужність, що генерується ВДЕ, значно перевищує споживану, додатковим керованим споживачем потужності виступає баластне навантаження (P_{BL}).

Друга акумуляторна батарея, яка підключена до шини в режимі заряджання, розглядається як частково керований споживач потужності (P_{ch}).

На рис. 2 наведені спрощені еквівалентні схеми заміщення HRES для двох основних режимів стабілізації:

- У режимі STAB1 (рис. 2.7, а) баланс потужності в системі забезпечується розрядом акумуляторної батареї.
- У режимі STAB2 (рис. 2.7, б) баланс потужності забезпечується роботою дизель-генератора.

Оскільки керовані джерела потужності повинні підтримувати стабільну напругу на DC-шині, вони повинні функціонувати в режимі керованих джерел напруги, тоді як усі інші енергетичні установки вважаються керованими або некерованими джерелами струму.

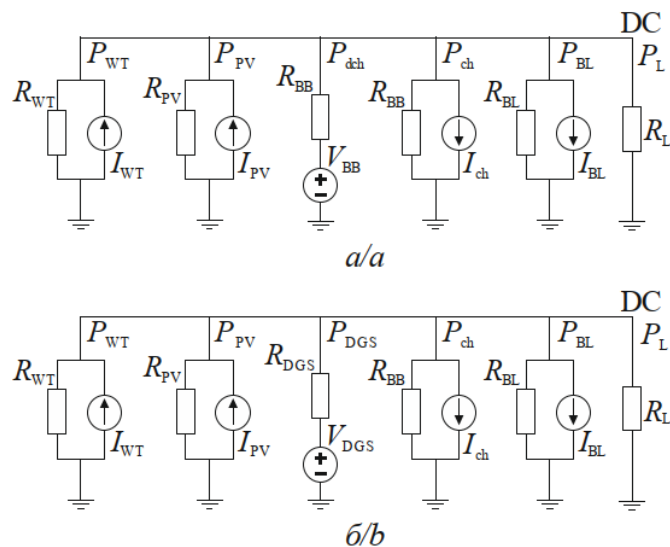


Рисунок 2.6 – Спрощені еквівалентні схеми заміщення гібридної енергетичної системи

Як критерій перемикавання режимів роботи HRES використовується значення сумарної залишкової ємності акумуляторних батарей ($\sum SOC$).

Схематична діаграма переходу між режимами стабілізації наведена на рис. 2.6.

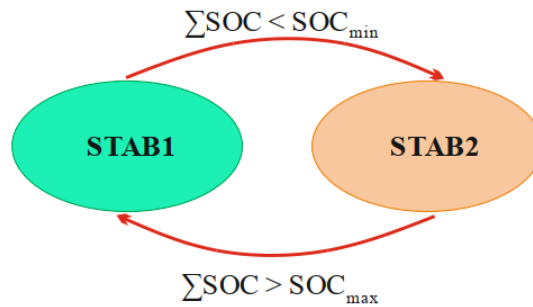


Рисунок 2.7 – Діаграма переходу між режимами стабілізації

Задані значення SOC_{min} і SOC_{max} визначаються на етапі конфігурації системи та залежать від типу використовуваної системи накопичення енергії (BESS), співвідношення потужностей основних генеруючих джерел, режимів експлуатації електростанції, характеру електричного навантаження споживача тощо. У загальному випадку вони підлягають оптимізації.

У розглянутій HRES прийняті наступні значення сумарної залишкової ємності обох акумуляторних батарей (BB): $SOC_{min} = 125 \%$, $SOC_{max} = 185 \%$ від їх номінальної ємності.

Вибір цих значень зумовлений тим, що в проєкті використовуються свинцево-кислотні накопичувачі енергії (BESS), що передбачає необхідність обмеження максимальної глибини розряду (Depth of Discharge – DOD) до 60 – 70 % від номінальної ємності.

У базовому варіанті використовуються три робочі зони напруги DC-шини (рис. 4):

- буферна зона (ZB – Buffer Zone),
- зона високої напруги (ZHV – High Voltage Zone),
- зона низької напруги (ZLV – Low Voltage Zone).

У зоні ZHV сумарна потужність генерації установок з відновлюваних джерел енергії (RES) перевищує сумарну потужність споживання. У режимах STAB1 і STAB2 як стабілізуюче джерело використовується регульоване баластне навантаження.

Конструктивно баластне навантаження являє собою набір резисторів, які підключаються до DC-шини через DC-DC перетворювач.

Значення струму (а відповідно – і потужності) перетворювача регулюється за наступним законом:

$$I_{BL-ref} = \frac{V_{DC} - V_{BL-min}}{V_{BL-max} - V_{BL-min}} \cdot I_{BL-max} \quad (2.2)$$

Рівняння (2.2) визначає лінійне змінення споживаної потужності баластним навантаженням – від 0 до номінального значення P_{BL-max} у діапазоні напруг від V_{BL-min} до V_{BL-max} .

Для практичної реалізації цього закону керування необхідно вимірювати два електричні параметри режиму:

- напругу DC-шини (V_{DC}),
- вхідний струм перетворювача (I_{BL}).

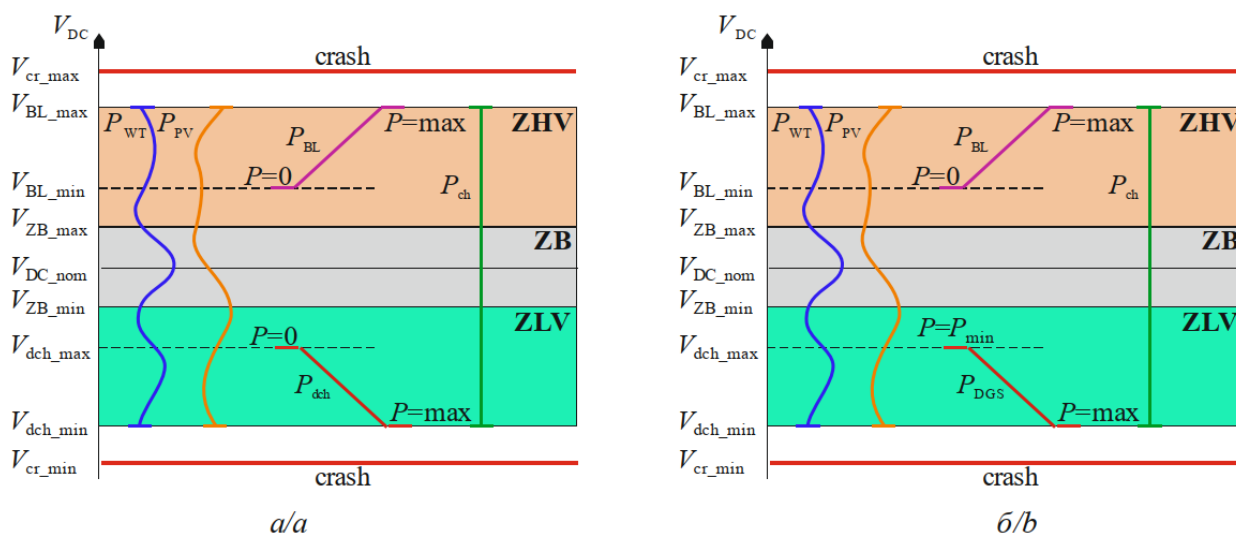


Рисунок 2.8 – Базовий варіант розподілу робочих зон напруги в режимі стабілізації: а) від акумуляторної батареї; б) від дизель-генераторної установки.

Червоними лініями на рис. 2.8 позначена зона безаварійного функціонування електростанції. Якщо значення напруги на DC-шині виходить за межі встановлених порогів V_{cr_min} і V_{cr_max} , то режим роботи енергетичної системи ініціюється як аварійний (crash), який усувається засобами протиаварійної автоматики.

У зоні низької напруги (ZLV) споживана потужність перевищує сумарну потужність генерації від установок ВДЕ (відновлюваних джерел енергії), і стабілізуючим джерелом у режимі STAB1 є акумуляторна батарея (ВВ), що працює в режимі розряду на DC-шину (див. рис. 2.8, а).

Значення струму (відповідно потужності) перетворювача розрядної ВВ у цьому режимі регулюється за наступним законом:

$$I_{dch-ref} = \frac{V_{dch-max} - V_{DC}}{V_{dch-max} - V_{dch-min}} \cdot I_{dch-max} \quad (2.3)$$

Рівняння (2.3) визначає лінійне змінення генерованої потужності розрядної акумуляторної батареї (ВВ) — від 0 до її номінального значення $P_{dch-max}$ у діапазоні напруг від $V_{dch-max}$ до $V_{dch-min}$. Як вхідні сигнали керування використовуються значення напруги на DC-шині (V_{DC}) та вихідного струму перетворювача I_{dch} .

Буферна зона (ZB) застосовується для надійного розмежування режимів роботи керованих джерел у системі. Крім того, її використання дозволяє мінімізувати (в ідеалі — повністю виключити) кількість переходів із зони високої напруги (ZHV) у зону низької напруги (ZLV), що можуть спричинити нестійкий або коливальний режим роботи системи керування.

У режимі STAB2 (див. рис. 2.8, б) головним регульованим джерелом енергосистеми виступає дизель-генераторна установка (DGS). Для збереження її експлуатаційного ресурсу необхідно мінімізувати кількість її вмикань і вимикань. Крім того, в робочому режимі DGS має працювати з навантаженням не менше 25 % від її номінальної потужності.

У базовому варіанті розподілу робочих зон напруги для режиму STAB2 розглядається варіант гарантованого заряду однієї ВВ, тоді як друга ВВ переходить у режим заряду лише після повного заряду першої.

Згідно з прийнятим алгоритмом, значення струму (відповідно потужності) перетворювача DGS регулюється за таким законом:

$$I_{DCS-ref} = \frac{V_{dch-max} - V_{DC}}{V_{dch-max} - V_{dch-min}} \cdot (I_{DCS-max} - I_{DCS-min}) + I_{DCS-min} \quad (2.4)$$

Практична реалізація умови (2.4), окрім гарантованого заряду одного акумуляторного контуру (ВВ) під час роботи DGS, також забезпечує прийнятний коефіцієнт завантаження дизельного двигуна. Це досягається шляхом обмеження та утримання струму DGS не нижче деякого заздалегідь

встановленого значення I_{DGS_min} , що відповідає мінімально допустимому навантаженню дизеля – наприклад, 25 % від його номінальної потужності.

Технічно ця вимога реалізується звуженням діапазону регулювання вихідного перетворювача DGS шляхом обмеження значень коефіцієнта заповнення (PWM). Слід зазначити, що для реалізації запропонованих алгоритмів керування необхідно дотримання низки важливих співвідношень, які забезпечують роботу енергетичної системи в межах безпечних робочих зон:

1. Значення максимально допустимої розрядної потужності одного контуру акумуляторної батареї (P_{BB_dch}) повинно бути більше за максимальне електричне навантаження (P_{L_max}):

$$P_{BB_dch} > P_{L_max}$$

2. Номінальне (максимальне) значення баластного навантаження повинно відповідати наступному рівнянню:

$$P_{BL_max} \geq P_{WT} + P_{PV} - P_{L_min}$$

Приватним випадком цього рівняння є умова, коли мінімальне електричне навантаження дорівнює нулю: $P_{L_min} = 0$.

3. Номінальна потужність дизель-генераторної установки (DGS) повинна забезпечувати покриття максимального електричного навантаження та необхідної потужності заряду акумуляторної батареї (BB):

$$P_{DGS_nom} \geq P_{L_max} + P_{ch}$$

Ідея запропонованої логіки керування режимами HRES полягає в перемиканні BB з режиму заряду в режим розряду і навпаки за заздалегідь заданими пороговими значеннями її залишкової ємності.

Відповідно, для практичної реалізації цієї логіки необхідний постійний моніторинг залишкової ємності кожної BB в реальному часі.

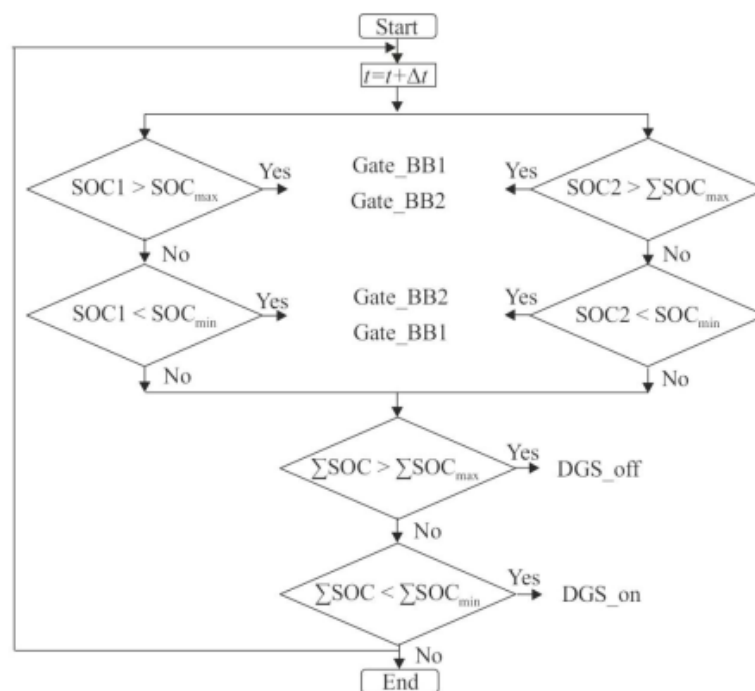
Крім того, потрібно здійснювати контроль сумарної залишкової ємності BB ($\sum SOC$), величина якої є критерієм перемикання режимів роботи енергетичної системи (див. рис. 2.8).

Логіку запропонованого способу керування режимами HRES ілюструє рисунок 2.9, на якому зображено: (а) блок-схема алгоритму керування режимами, (б) силові схеми підключення BESS і DGS до загальної DC-шини.

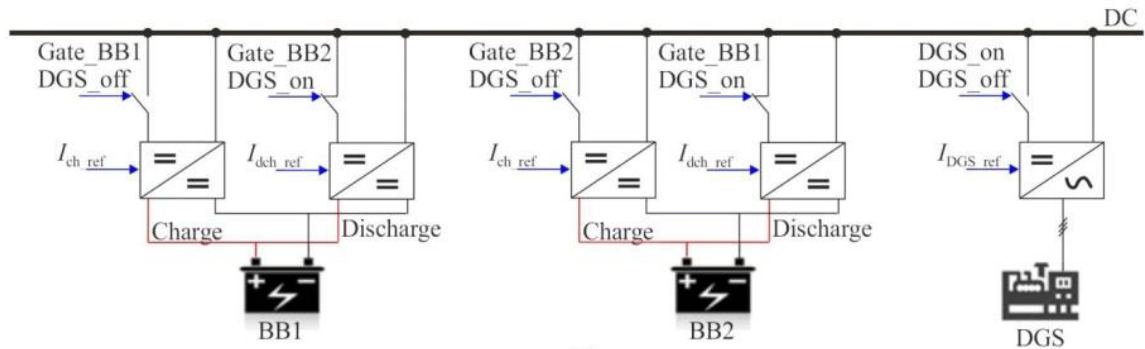
Одним із можливих варіантів схемотехнічного реалізації контролера CES є розподіл функцій локального та стратегічного керування перетворювачами. Аналогічним чином може бути побудована й система керування перетворювачем DGS.

У рамках цього підходу:

- Сигнали прямого керування ключами перетворювачів (I_{ch_ref} , I_{dch_ref} , I_{DGS_ref}) формуються локальним струмовим контуром залежно від поточних значень напруги на DC-шині та вихідного (вхідного) струму відповідного перетворювача.
- Сигнали перемикання режимів роботи (Gate_BB1, Gate_BB2, DGS_on/off) формуються логічним блоком контролера відповідно до поточних значень залишкової ємності BB.



а



б

Рисунок 2.9 – Логіка запропонованого способу керування режимами гібридної енергетичної системи: а) блок-схема алгоритму керування; б) силові схеми підключення стабілізуючих джерел.

На силовій схемі підключення стабілізуючих джерел (рис. 2.9, б) для більшої наочності показано, що сигнали керування, сформовані логічним блоком контролера, забезпечують безпосереднє вмикання/вимикання перетворювачів BB та DGS шляхом застосування додаткових ключів.

У реальних схемах побудови перетворювачів використання додаткових ключів не є обов'язковим, оскільки процеси вмикання/вимикання можуть реалізовуватись шляхом керування транзисторами силової частини.

Отже, результати проведених досліджень показали, що запропонований спосіб побудови та алгоритм керування режимами HRES забезпечують надійне й ефективне управління балансом потужності в HRES у всіх можливих експлуатаційних режимах. Перевагами запропонованих технічних рішень є: забезпечення режимів заряду акумуляторних батарей стабільним струмом, мінімізація режимів неповного заряду/розряду та ефективне використання потенціалу первинної відновлюваної енергії.

РОЗДІЛ 3. РОЗРОБКА КОНЦЕПТУАЛЬНОЇ МОДЕЛІ РОБОТИ ГІБРИДНОЇ СОНЯЧНОЇ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЇ В СИСТЕМІ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ

3.1 Аналіз моделей роботи гібридної сонячної електростанції в системі електропостачання

У сучасних умовах забезпечення стабільного, надійного та екологічно чистого енергопостачання набуває стратегічного значення. Зростаючі ціни на традиційні енергоносії, виснаження ресурсів та глобальні кліматичні виклики стимулюють розвиток відновлюваних джерел енергії (ВДЕ), серед яких особливе місце займає сонячна енергетика. Проте її використання пов'язане з певними проблемами, зокрема:

- нестабільність генерації (залежність від погодних умов, часу доби, сезонності);
- обмежена ефективність у пікові години споживання;
- необхідність накопичення енергії для забезпечення безперебійного живлення.

У зв'язку з цим у фокусі уваги науковців і інженерів опиняються гібридні системи електропостачання, які поєднують фотоелектричні модулі з іншими джерелами живлення – мережею, акумуляторними батареями, дизель-генераторами тощо.

Теоретичні передумови

Гібридні сонячні електростанції (ГСЕС) мають низку переваг:

- Підвищення надійності живлення об'єкта;
- Можливість накопичення та раціонального розподілу електроенергії;
- Зменшення споживання електроенергії з мережі або дизельного палива;
- Скорочення експлуатаційних витрат та викидів CO₂.

Залежно від конфігурації, гібридні СЕС можуть працювати:

- У паралельному режимі з мережею (on-grid hybrid);
- В автономному режимі (off-grid hybrid);
- У змішаному режимі, коли система автоматично переключається між джерелами залежно від умов.

Огляд існуючих рішень системи гібридного живлення активно впроваджуються у побутових, комерційних та промислових об'єктах. Провідні виробники (SMA, Victron, Huawei, Schneider Electric, Tesla) пропонують інтелектуальні інвертори та енергетичні керуючі системи (EMS), які дозволяють:

- моніторити генерацію та споживання в реальному часі;
- автоматично перемикатися між джерелами;
- оптимізувати заряд/розряд акумуляторів;
- здійснювати резервне живлення критичних навантажень.

Однак при проектуванні кожної конкретної системи необхідна розробка власної концептуальної моделі, яка враховує:

- тип навантаження (постійне, змінне, критичне);
- кліматичні умови регіону;
- режим роботи (автономний, мережевий, резервний);
- економічну доцільність інвестицій.

Проблеми, що потребують вирішення

1. Оптимальний розподіл навантаження між джерелами.
2. Балансування між ефективністю, надійністю та вартістю системи.
3. Управління процесами заряджання/розряджання акумуляторів для збільшення їх терміну служби.
4. Адаптація системи до змін в умовах споживання чи генерації.
5. Інтеграція з «розумними мережами» (smart grids).

Отже, аналіз показує, що гібридна СЕС – це ефективне рішення для забезпечення енергетичної безпеки та сталої генерації. Проте її розробка вимагає побудови чіткої концептуальної моделі з урахуванням технічних,

економічних та кліматичних чинників. Така модель повинна враховувати не лише генерацію та накопичення енергії, але й інтелектуальне управління ресурсами для досягнення максимальної ефективності.

3.2 Моделювання принципу роботи гібридної СЕС у складі системи електропостачання

В якості основного інструменту досліджень у цій роботі використовувався програмний комплекс MATLAB/Simulink, у середовищі якого відповідно до структурної схеми HRES (рис. 3.1) були розроблені та реалізовані математичні моделі всіх основних компонентів розглядуваної технічної системи. До складу комплексної моделі HRES входить п'ять типів моделей: моделі первинних енергоносіїв (модель вітрового потоку і сонячного випромінювання), моделі енергетичних установок (DGS, WT, PV), моделі акумуляторних пристроїв (SC, BESS), моделі споживачів енергії (L, BL), а також моделі силових напівпровідникових перетворювачів.

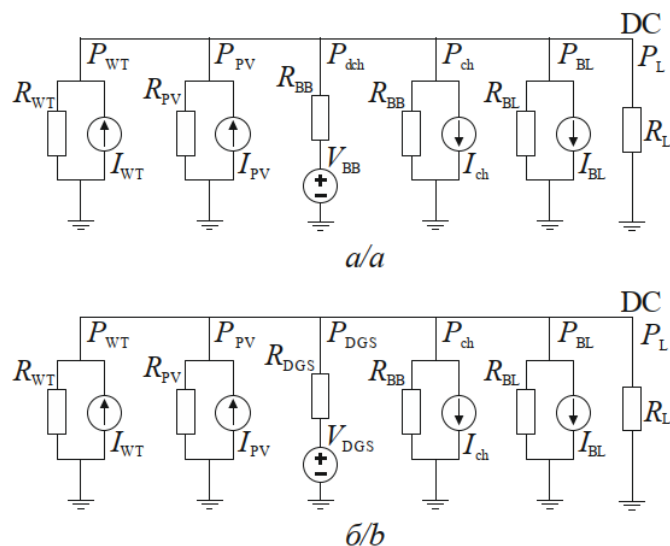


Рисунок 3.1 – Спрощені еквівалентні схеми заміщення гібридної енергетичної системи

У роботі використовувалися динамічні моделі компонентів, побудовані на основі рівнянь, що описують фізичні процеси перетворення енергії. Детальний опис моделей компонентів HRES, які застосовувалися в дослідженнях, наведено у роботах [13–17]. Моделі компонентів виконані у вигляді окремих функціональних блоків, що забезпечує можливість побудови та дослідження режимів роботи HRES довільної конфігурації [8].

Об'єктом дослідження в роботі прийнято автономну HRES, територіально розташовану в районі м. Львів, що складається з WT номінальною потужністю 10 кВт ($V_{\min}=3$ м/с, $V_{\text{ном}}=9$ м/с), PV на базі сонячної батареї з 18 фотоелектричних модулів Sunways FSM 340M, дизель-генераторного агрегату Geko 20012 ED-S/DEDA номінальною потужністю 16 кВт, CES на базі акумуляторів MONBAT 12MVR200 у кількості 20 штук на один контур і суперконденсаторного модуля з трьох послідовно з'єднаних суперконденсаторів МСК-8-112 загальною ємністю 2,7 Ф.

Для моделювання електричного навантаження HRES використовувався типовий добовий графік навантажень комунально-побутового характеру з максимумом 10 кВт, величина максимальної баластної навантаження прийнята рівною 16,2 кВт. Розглядався варіант PV з жорстко зафіксованою сонячною батареєю, орієнтованою на південь і встановленою під кутом 50° до горизонту.

3.3 Результати моделювання принципу роботи гібридної СЕС у складі системи електропостачання

Під час перевірки працездатності та апробації запропонованих технічних рішень використовувалися результати комп'ютерного моделювання робочих режимів HRES. Було розроблено план досліджень, згідно з яким проведено серію обчислювальних експериментів, що моделюють статичні та динамічні режими HRES, можливі під час її експлуатації.

Як приклад, на рис. 3.2 показано результати моделювання вихідної електричної потужності установок RES (P_{PV} та P_{WT}) на добовому часовому

інтервалі (86400 с). Добові зміни сонячної радіації (G) відповідають дню зимового сонцестояння із середніми умовами хмарності. Швидкість вітру (V) задана східчастою функцією з амплітудою від 2 до 8 м/с, яка змінюється у моменти модельного часу 10000 та 50000 с.

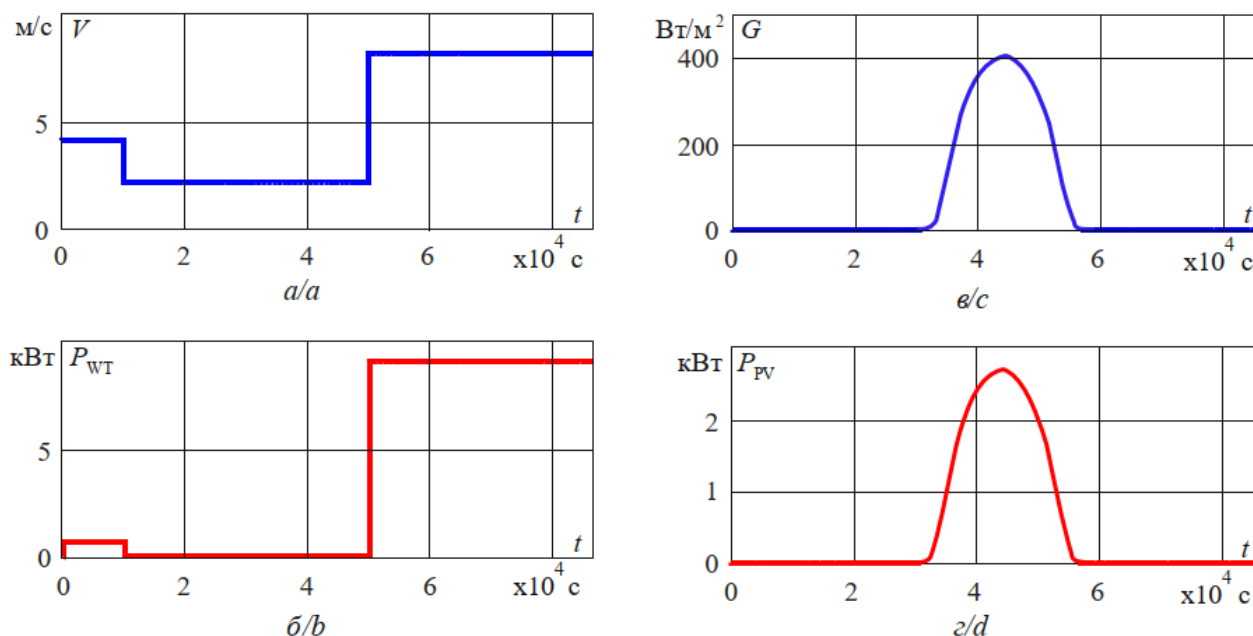


Рисунок 3.2 – Результати моделювання вихідної електричної потужності установок відновлюваної енергетики на добовому часовому інтервалі: а) швидкість вітру; б) потужність вітроенергетичної установки; в) сонячна радіація; г) потужність сонячної батареї.

Явне завдання швидкості вітру, яка залишається незмінною на тривалих часових інтервалах, дозволяє вирішити дві задачі: з одного боку, суттєво скоротити вимоги до обчислювальних ресурсів комп'ютера і таким чином зменшити час моделювання; з іншого боку – виділити для подальшого аналізу необхідні режими функціонування CES та всієї енергетичної системи.

Результати моделювання робочих режимів HRES для заданих характеристик первинних енергоносіїв наведені на рис. 3.3. На рисунку показані графіки зміни розрядного струму (I_{dch}), струму заряду (I_{ch}) і залишкової ємності (state of charge – SOC) акумуляторних батарей BB1 та BB2, напруги збірної шини (V_{DC}), струмів, що входять та виходять з DC-шини: сумарного

струму від установок RES (IRES), струму корисного (I_L) та баластного (I_{BL}) навантажень, струму дизель-генератора DGS (I_{DGS}).

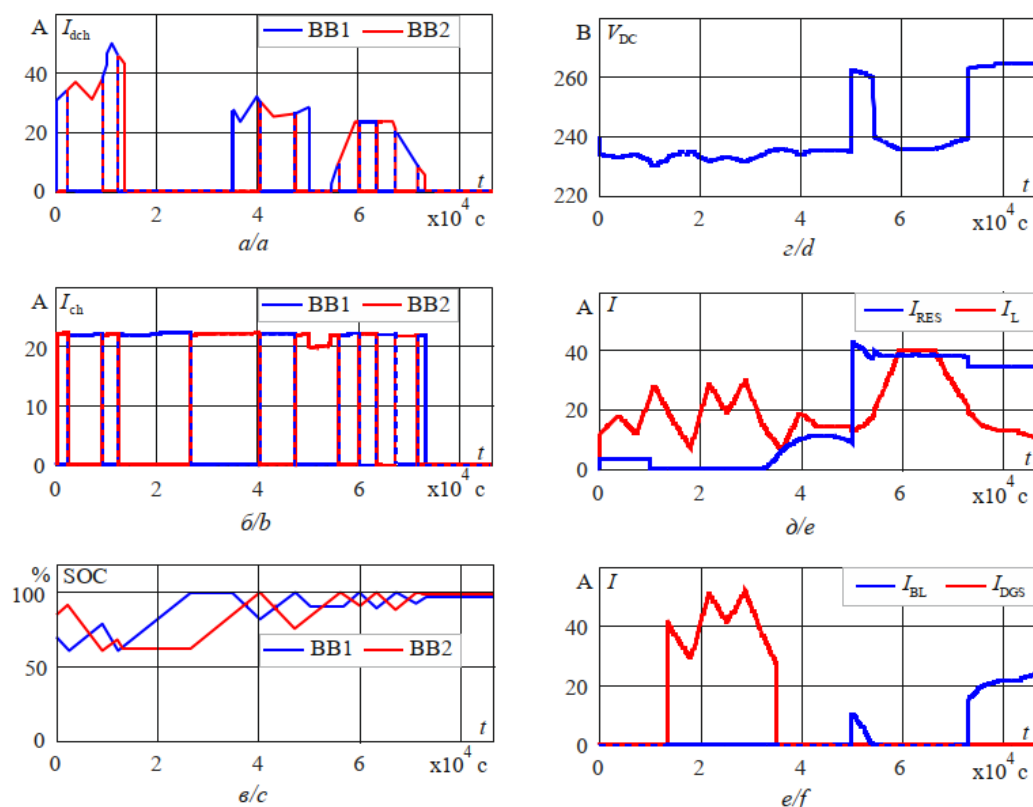


Рисунок 3.3 – Результати моделювання робочих режимів гібридної енергетичної системи на добовому часовому інтервалі: а) розрядний струм акумуляторних батарей; б) зарядний струм акумуляторних батарей; в) залишкова ємність акумуляторних батарей; г) напруга збірної шини; д) сумарний струм установок відновлюваної енергетики та струм навантаження; е) струм баластного навантаження і струм дизель-генераторної установки.

На рис. 3.4, 3.5 представлені результати моделювання добового режиму роботи HRES з урахуванням турбулентної складової швидкості вітру. У цьому обчислювальному експерименті розглядається день літнього сонцестояння за середніх умов хмарності. Середня швидкість вітру протягом доби стрибкоподібно змінюється від 0 до 10 м/с (рис. 3.4), що відповідає всьому робочому діапазону моделюваної вітроустановки (WT). Як видно з графіків, наведених на рис. 3.5, система керування CES забезпечує надійне та ефективне управління балансом потужності в ізолюваній енергетичній системі в усіх можливих експлуатаційних режимах.

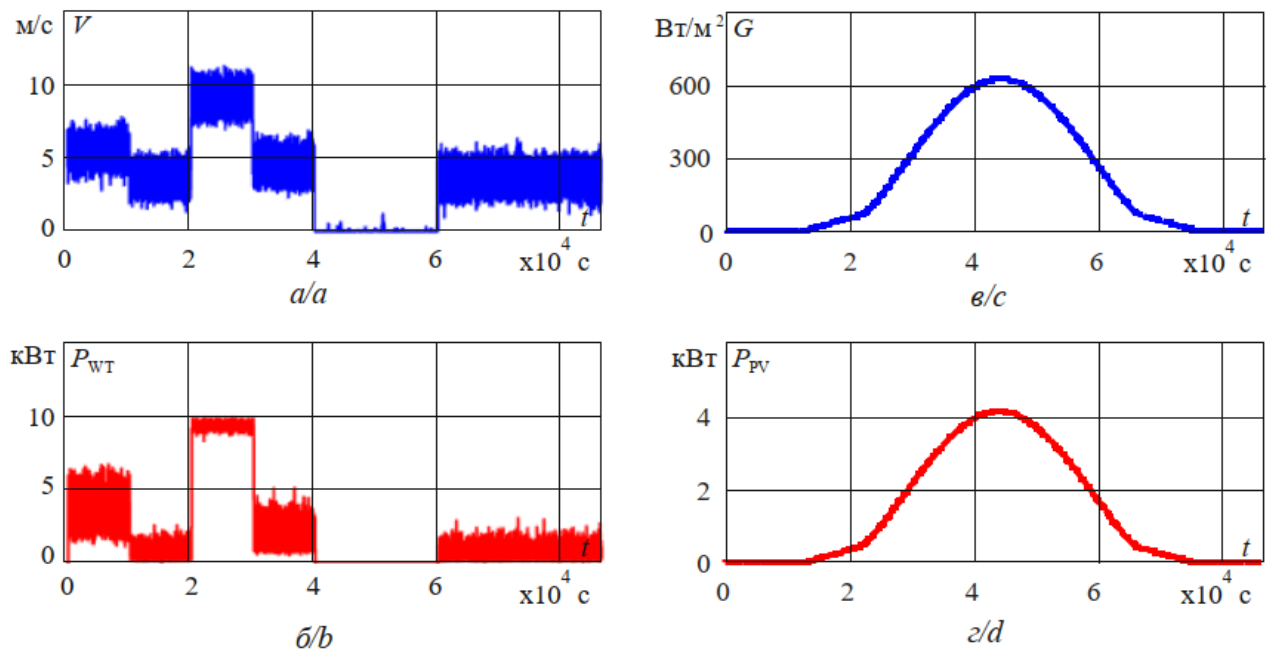


Рисунок 3.4 – Результати моделювання вихідної електричної потужності установок відновлюваної енергетики на добовому часовому інтервалі: а) швидкість вітру; б) потужність вітроенергетичної установки; в) сонячна радіація; г) потужність сонячної батареї.

Результати проведених обчислювальних експериментів підтвердили працездатність запропонованої архітектури та алгоритму управління режимами автономної HRES із високим рівнем заміщення палива.

Перевагами розглянутого алгоритму керування CES є його відносна простота та універсальність. Цей алгоритм забезпечує режими заряджання акумуляторних батарей (BB) стабільним струмом і мінімізує кількість перемикань BB з режиму заряджання в режим розряджання та навпаки, що забезпечує їх збереження та максимальний експлуатаційний ресурс.

Запропонована архітектура побудови HRES дозволяє використовувати в її складі силові напівпровідникові перетворювачі з неузгодженими характеристиками та простою схемотехнікою. З точки зору експлуатаційної надійності, HRES є достатньо живучою, оскільки не потребує інформаційного зв'язку між перетворювачами установок RES. Відмова будь-якого перетворювача або генеруючого джерела, окрім вихідного інвертора, не порушує загальної працездатності енергетичної системи. Забезпечується простота зміни конфігурації системи шляхом додавання/виключення у склад

електростанції генеруючих установок різного типу й різних виробників без необхідності зміни налаштувань системи управління.

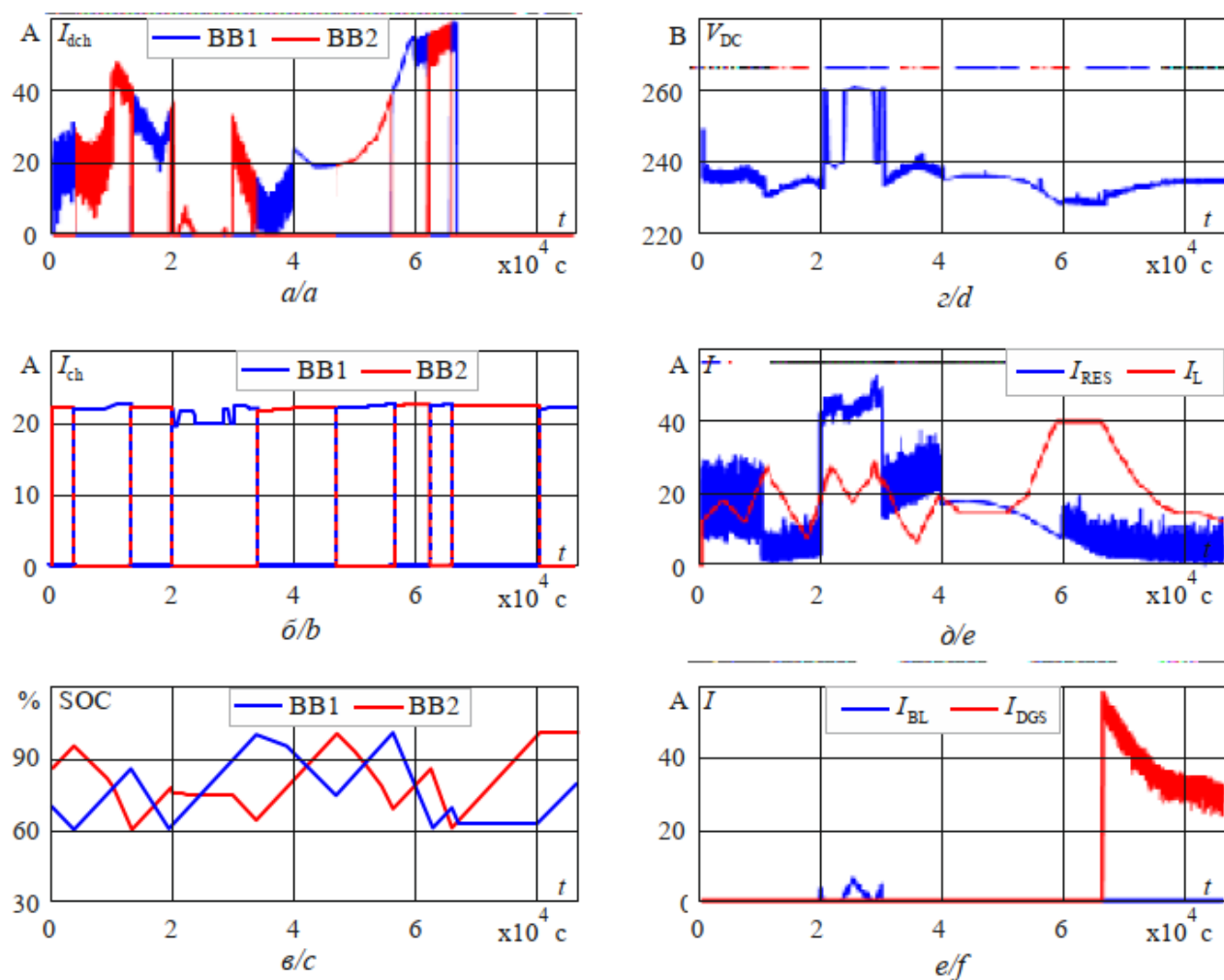


Рисунок 3.5 – Результати моделювання робочих режимів гібридної енергетичної системи на добовому часовому інтервалі: а) розрядний струм акумуляторних батарей; б) зарядний струм акумуляторних батарей; в) залишкова ємність акумуляторних батарей; г) напруга збірної шини; д) сумарний струм установок відновлюваної енергетики та струм навантаження; е) струм баластного навантаження та струм дизель-генераторної установки.

Проведений розрахунок надійності HRES показав, що застосування CES із запропонованим алгоритмом управління режимами забезпечує зниження інтенсивності відмов енергетичної системи на 5,7 % та збільшення експлуатаційного ресурсу ВВ на 50 %. Для розрахунку показників надійності HRES використовувався логіко-імовірнісний метод на основі структурних схем

надійності [29]. Як вихідні дані використовувалися типові показники надійності елементів досліджуваної системи, встановлені за технічною специфікацією [30], а експлуатаційний ресурс ВВ визначено за результатами досліджень [9–11].

Аналіз річного енергетичного балансу розглянутої HRES, розташованої в районі м. Томськ, показав, що застосування CES із запропонованим алгоритмом управління забезпечує збільшення генерації енергії установками RES, а відповідно — підвищення ефективності використання енергії на 28 % у порівнянні зі стандартними способами побудови HRES. Слід зазначити, що значення цього показника значною мірою залежить від енергетичного потенціалу RES у місці розташування електростанції, співвідношення встановлених потужностей та технічних характеристик основного енергетичного обладнання й навантаження, і може досягати до 60 % [31].

На даний час на виробничому майданчику ТОВ «ВДМ-техніка» виготовлено експериментальний зразок CES на номінальну потужність 15 кВт на основі акумуляторних і суперконденсаторних модулів, розроблено комплект ескізної конструкторської документації, програму та методику його дослідних випробувань. У 2020 році заплановано проведення випробувань експериментального зразка CES у складі стенду-полігона локальної системи електропостачання з відновлюваними джерелами енергії, що дозволить оцінити можливість і ефективність його практичного застосування в реальних енергетичних системах, перевірити прийняті компоновочні рішення, а також знайти технічні рішення, які забезпечать удосконалення його конструкції.

РОЗДІЛ 4 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА ДОВКІЛЛЯ

4.1 Організація роботи служби з охорони праці та довкілля

Система управління охороною праці (СУОП) – це сукупність органів управління підприємством, які на підставі комплексу нормативної документації проводять цілеспрямовану, планомірну діяльність щодо здійснення завдань і функцій управління з метою забезпечення здорових безпечних і високопродуктивних умов праці. За дану частину виробництва відповідає інженер з охорони праці. Головне завдання спеціаліста – створення здорових, безпечних і високопродуктивних умов праці, покращення виробничого побуту, запобігання травматизму і профзахворюванням.

Для забезпечення створення СУОП щорічно розробляються та затверджуються на підприємстві положення про організацію управління охорони праці; щорічно оформляються накази про призначення осіб відповідальних за стан охорони праці на дільницях, а також безпечне використання об'єктів підвищеної небезпеки (котлів, що працюють під тиском, газових та кисневих балонів, пестицидів); оформляються наказ про визначення персональних обов'язків з охорони праці усіх спеціалізацій, керівників дільниць та інших службових осіб; щорічно проводиться паспортизація умов праці, технічних засобів безпеки і технічного стану робочих місць; складаються плани роботи з охорони праці, комплексне, річне і оперативне планування; організовуються заходи матеріального і морального стимулювання щодо охорони праці; проводяться розслідування і вивчення причин травм, пожеж їх аналіз і облік, а також розробляються заходи щодо їх застосування;

Об'єктом управління є діяльність структурних підрозділів та служб підприємства по забезпеченню безпечних і здорових умов праці на робочих місцях, виробничих дільницях, цехах та підприємства в цілому.

4.2 Протипожежна безпека і грозовзахист

Блискавко захист – це комплекс захисних захистів від блискавки, які гарантують безпеку людей, збереження людей і споруд, обладнання та матеріалів від вибухів, загоряння й руйнування. Найпростішими і надійними засобами від блискавки є створення блискавковідводів. Схема блискавкозахисту будівлі показана на рис. 4.1.

Струмопровід виконується сталюю стрічкою перерізом 25...30 мм або дротом не менше 6 мм. Заземлення виконується кутовою сталлю, трубами на відстані від установки не менше 4,5 м. Опір розтікання не повинен перевищувати 15....20 Ом.

Приймаємо початкову висоту блискавковідводу 8 метрів. Визначаємо радіус конуса, в якому ймовірність попадання 95%, через висоту конуса h за формулою (4.1):

$$R_0 = 1.5 \cdot h, \text{ м. } R_0 = 1,5 \cdot 8 = 12 \text{ м.}$$

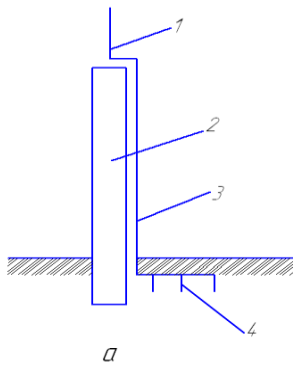


Рисунок 4.1 – Схема блискавко захисту конструкції; 1 – блискавко приймач,
2 – блискавко провідник; 3 – опора, 4 – заземлювач.

Для будинку довжиною L кількість одиночних блискавковідводів визначаємо через радіус конуса R_0 в якому ймовірність попадання 95% за формулою:

$$N_0 = \frac{L}{2R_0}, \text{ шт,} \quad N_0 = \frac{86}{2 \cdot 4} = 11 \text{ шт.}$$

Усі з'єднання в процесі монтажу системи блискавко захисту (Блискавко приймач – струмовідвід, струмовід – заземлювач) виконують за допомогою зварювання. Болтові з'єднання застосовують лише для тимчасових блискавко захисних пристроїв.

РОЗДІЛ 5. ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ВИКОРИСТАННЯ ГІБРИДНОЇ СОНЯЧНОЇ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЇ В СИСТЕМІ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ

5.1 Обґрунтування економічної ефективності роботи сонячних електричних станцій в системах електропостачання

У цьому розділі проаналізовано економічну ефективність сонячних електростанцій на прикладі кінцевих споживачів електроенергії, відображено економічні переваги розвитку сонячної енергетики, екологічні вигоди «зеленого» переходу та соціальні ефекти, що виникають через здешевлення електроенергії й притік інвестицій у фотоелектричні установки (PVI). Річна економія, досягнута завдяки PVI, оцінювалася як різниця між обсягами виробництва та власного споживання електроенергії.

Застосувавши факторний аналіз, групування даних, узагальнені інтегральні показники й матричний метод разом із кількісними даними про сонячні фотоелектричні системи, було підтверджено дві ключові гіпотези: по-перше, виробництво електроенергії з сонячних панелей потребує стимулювання через виважену державну тарифну політику; по-друге, у формуванні тарифів слід враховувати інтереси всіх учасників ринку. Також встановлено, що за поточних процентних ставок операційна діяльність PVI значною мірою залежить від економічних чинників – фінансових можливостей споживачів, рівня оподаткування чи дотацій, продуктивності обладнання та його технічного стану.

Дослідження створює теоретичну й емпіричну основу для розробки комплексної державної політики у сфері сонячної електроенергетики з урахуванням нерівномірності виробництва та споживання електроенергії через природно-кліматичні умови й технічні характеристики PVI. Факторний аналіз дозволив сформувати масиви даних про обсяги виробництва й споживання, а метод групування систематизував і класифікував інформацію (зокрема дані фотоелектричного виробництва, наведені в табл. 5.1).

Метод узагальнення показників дозволив комплексно охарактеризувати сонячні енергетичні системи від виробництва електроенергії до її реалізації, виокремити ключові етапи функціонування PVI та виявити моделі й закономірності руху енергії. Збір кількісних даних про обсяги виробленої та власного споживання електроенергії, потужність сонячних модулів, рівень інсоляції й ефективність інверторів дав змогу провести тематичне дослідження

на рівні домогосподарства, здійснити кількісний аналіз отриманих результатів і узагальнити їх для широкої категорії користувачів; очікується, що впровадження PVI забезпечить значну економію коштів завдяки низьким капіталовкладенням, невисоким експлуатаційним витратам та короткому терміну окупності.

Таблиця 5.1 – Виробництво СЕС електричної енергії та споживання одного із дослідних об'єктів інфраструктури за січень 2024 р.

Номер дня в році	Дата	Споживання, кВт·год	Генерування СЕС, кВт·год	Ціна за спожитої ел. ен. , грн.	Ціна згенерованої ел.ел., грн.	Різниця по потужності, кВт·год	Різниця по ціні, грн.
1	Січень	104,9	112,2	276,94	467,96	7,3	191,02
2	Лютий	108,1	110,8	285,38	418,82	2,7	133,44
3	Березень	95,3	111,9	251,59	422,98	16,6	171,39
4	Квітень	90,5	130,8	238,92	494,42	40,3	255,5
5	Травень	88,7	140,8	234,17	532,22	52,1	298,05
6	Червень	80,2	170,6	211,73	644,87	90,4	433,14
7	Липень	80,3	178,9	211,99	676,24	98,6	464,25
8	Серпень	79,8	175,1	210,67	661,88	95,3	451,21
9	Вересень	83,5	130,2	220,44	492,16	46,7	271,72
10	Жовтень	87,6	125,3	231,26	473,63	37,7	242,37
11	Листопад	93,2	121,9	246,05	460,78	28,7	214,73
12	Грудень	103,7	110,5	273,77	417,69	6,8	143,92
Σ		1095,8	1619	2892,91	6163,65	523,2	3270,74

Матричний метод використано для розрахунку фактичного річного обсягу купівлі електроенергії та щорічної економії: погодинні значення споживання й генерації коригувалися на заданий відсоток для обчислення

коефіцієнта витрат електроенергії, із кроком дискретності понад 0,001 кВт·год; на основі цих розрахунків формується «матриця потенційної енергії», яка для кожної години τ (1–8760) визначає можливі комбінації виробництва й споживання. Функціонально-вартісний аналіз використовується для визначення показника функціональної ефективності PVI як співвідношення корисної віддачі до витрат на придбання та обслуговування, що дає змогу порівняти варіанти оснащення, оцінити економічну доцільність і обґрунтувати оптимальні параметри державної тарифної політики в галузі сонячної електроенергетики.

$$P_{fe} = \frac{Z_{fv}}{\Phi B} \Rightarrow \min \quad (5.1)$$

де Z_{fv} – витрати на забезпечення відповідної функції енергетичного засобу, грн.; ΦB – функціональна вартість досліджуваного варіанта системи, яка виражається вартістю її продуктивності, грн.

$$P_{fe} = \frac{3698}{1235} = 2,99 \text{ грн.}$$

Узагальненим показником функціонально-вартісного аналізу може слугувати термін окупності капіталовкладень, що є зручним критерієм для вибору раціональної структури енергетичної системи.

$$T_{ок} = \frac{B_{pv}}{E}, \quad (5.2)$$

$$T = \frac{7208}{(6163,65 - 2892,91)} = 2,2 \text{ р.}$$

де B_{pv} – вартість сонячної електростанції, яка включає власне вартість обладнання та його монтаж, грн.; E – економічний ефект від застосування сонячної електростанції, який виражається вартістю виробленої електроенергії за винятком вартості спожитої електроенергії, а також податків, грн.

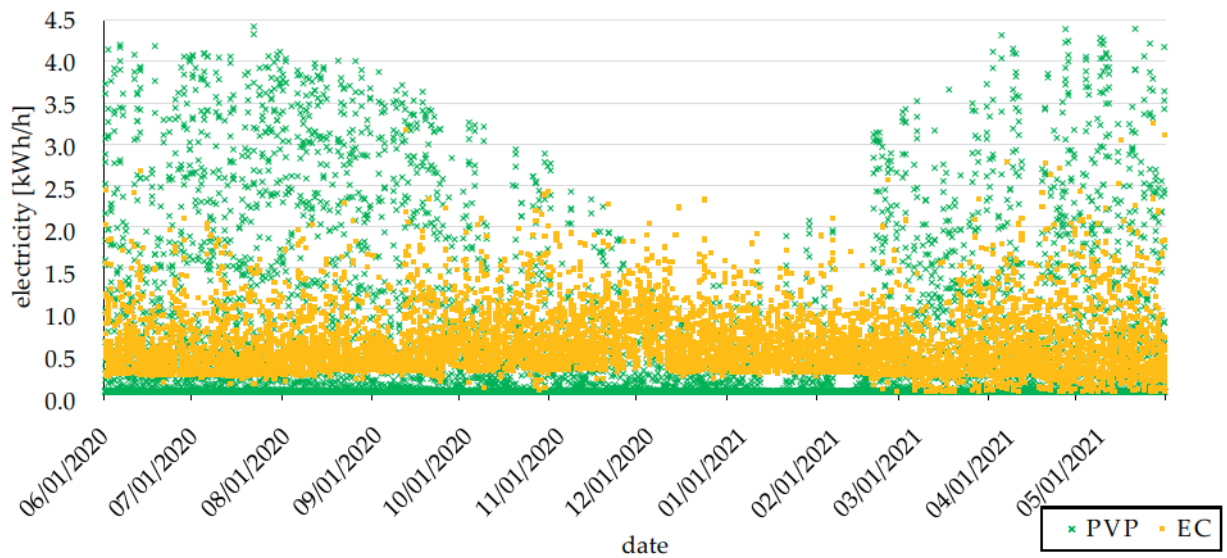


Рисунок 5.1 – Річне споживання електроенергії від PVI одного домогосподарства (PVP – виробництво енергії, EC – споживання енергії)

Споживачі відіграють ключову роль у розвитку сонячної енергетики, впливаючи на тарифну політику, конкуренцію та економічну ефективність PVI, яка залежить від природно-кліматичних умов, технічного стану обладнання, платоспроможності та податкового середовища, що обґрунтовує необхідність державної підтримки та подальших досліджень з урахуванням механізмів, як-от чисте виставлення рахунків.

ВИСНОВКИ І ПРОПОЗИЦІЇ

Результати проведених досліджень показали, що запропонований спосіб побудови та алгоритм керування режимами роботи гібридної відновлюваної енергетичної системи (HRES) забезпечують надійне та ефективне керування балансом потужності в усіх можливих експлуатаційних режимах. До основних переваг запропонованих технічних рішень можна віднести:

- забезпечення стабільного струму заряджання акумуляторних батарей;
- мінімізацію режимів неповного заряджання та розряджання;
- ефективне використання потенціалу первинної відновлюваної енергії.

В умовах реалізації стратегічних цілей розвитку енергетики України актуальним напрямом стає використання мобільних відновлюваних систем енергопостачання (MBSE) для забезпечення електроенергією автономних споживачів, віддалених від централізованих енергетичних мереж.

Проведений аналіз переваг і недоліків, енергетичних параметрів, особливостей функціонування MBSE, а також вимог до якості електроенергії з боку споживачів дає змогу підвищити ефективність передпроектних розробок зі створення енергоефективних мобільних електростанцій для автономного енергопостачання.

Покращення експлуатаційно-технічних характеристик MBSE можливе завдяки застосуванню сучасної елементної бази та реалізації принципу модульної агрегатності під час побудови функціональних вузлів станції.

Перспективними напрямками подальших досліджень є питання електромагнітної сумісності основних силових компонентів MBSE та оптимізація їх структурно-схемних рішень з урахуванням графіків електричних навантажень автономних споживачів.

ПОСИЛАННЯ ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Гальчак В. П., Боярчук В. М. Альтернативні джерела енергії. Енергія Сонця. Львів: Вид-во ЛНАУ, 2008. 135 с.
2. Гальчак В. П., Дмитрів Г. М. Розрахунок енергетичних параметрів гібридної системи теплопостачання фермерського будинку. Метод. вказівки до виконання курсового проекту. Львів, ЛДАУ, 2005. 36 с.
3. Дудюк Д. Л., Мазепа С. С., Гнатишин Я. М. Нетрадиційна енергетика: основи теорії та задачі: Навч. посіб. Львів: "Магнолія 2006", 2008. 188 с.
4. Жуковський С. С., Лабай В. Й. Системи енергопостачання і забезпечення мікроклімату будинків та споруд: Навч. пос. для ВЗО. Львів: Астрономо-геодезичне товариство, 2000. 259 с.
5. Корчемний М., Федорейко В., Щербань В. Енергозбереження в агропромисловому комплексі. Тернопіль: Підручники і посібники, 2001. 984 с.
6. Кудря С. О., Головка В. М. Основи конструювання енергоустановок з відновлюваними джерелами енергії: навч. посіб. К.: НТУУ "КПІ", 2011. 184 с.
7. Малярєнко В. А. Основи теплофізики будівель та енергозбереження. Підручник. 2-е видання. Х.: Видавництво САГА, 2010. 484 с.
8. Малярєнко В.А. Енергетичні установки. Загальний курс. Х.: В-во САГША, 2008. 320 с.
9. Саницький М. А., Позняк О. Р., Марущак У. Д. Енергозберігаючі технології в будівництві: навч. посібник. Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2012. 236 с.
10. <https://uniclimate.com.ua/products/teplovi-nasosy-dlya-pryvatnogo-budynku/cooperhunter-unitherm-3-all-in-one-ch-hp12wtsirk3/>
11. <https://uniclimate.com.ua/wp-content/uploads/2023/02/instrukciya-unitherm3-aio-ua.pdf>

12. https://cooperhunter-aircon.com/?gclid=Cj0KCQjw7aqkBhDPArisAKGa0oLWwriPnZqdYFkAdTEGwILGKZiUW6zYhudeqKqlb11QuAZmcjiDyL0aAqmlEALw_wcB
13. R. K. Sarojini, K. Palanisamy and E. De Tuglie, “A fuzzy logic- based emulated inertia control to a supercapacitor system to improve inertia in a low inertia grid with renewables,” *Energies*, Vol. 15, no. 4, Article ID 1333, 2022.
14. O. Abdel-Rahim and E. Abdelhameed, “Ultimate transformerless boost DC-DC converter for renewable energy applications,” *SVU-International Journal of Engineering Sciences and Applications*, Vol. 2, no. 2, pp. 63–69, 2021.
15. J. B. Holm-Nielsen, and D. Almakhlles, “A hybrid PV-battery system for ON-grid and OFF-grid applications-controller in loop simulation validation,” *Energies*, Vol. 13, No. 3, P. 755, 2020.
16. V. Burlaka, S. Gulakov, S. Podnebennaya, E. Kudinova, and O. Savenko, “Bidirectional single stage isolated DC-AC converter,” in *Proceedings of the 2020 IEEE KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek)*, PP. 343–346, IEEE, Kharkiv, Ukraine, 2020, October.
17. S. Deshmukh, A. R. Thorat, and I. Korachagaon, “Modelling and analysis of PV standalone system with energy management scheme,” in *Proceedings of the 2020 IEEE International Conference on Electronics, Computing and Communication Technologies (CONECCT)*, PP. 1–5, IEEE, Bangalore, India, 2020, July.
18. K. Amer, M. Fakher, S. Ahmad, M. Irhouma, S. Altafbao and E. Salem, “Performance of domestic solar heating system with thermal storage using phase change materials,” *International Journal of Engineering Research and Development*, Vol. 16, no. 9, PP. 01–11, 2020.
19. E. S. Harsha, R. K. Nema, S. Nema, and R. D. Kulkarni, “Design & Simulation of high gain ratio Bidirectional converter for energy storage applications,” in *Proceedings of the 2020 International Conference on Computational Intelligence for Smart Power System and Sustainable Energy (CISPSSE)*, pp. 1–6, IEEE, Keonjhar, India, 2020, July.

20. Y. Nassar, S. Alsadi, K. Amer, A. Yousef, and M. Fakher, "Numerical analysis and optimization of area contribution of the PV cells in the PV/T flat-plate solar air heating collector," *Solar Energy Research Update*, Vol. 6, PP. 43–50, 2019.
21. M. Schroeder and J. Jaeger, "Advanced energy flow control concept of an MMC for unrestricted operation as a multiport device," *IEEE Transactions on Power Electronics*, Vol. 34, №. 11, PP. 11–496, 2019.
22. M. S. Chinthavali, J. Sun, P. R. V. Marthi, S. Chinthavali, S. Lee and M. Elizondo, *Models and Methods for Assessing the Value of Hvdc And Mvdc Technologies in Modern Power Grids*, Pacific Northwest National Lab, United States, May 2019.
23. S. Yassin Alsadi and Y. Fathi Nassar, "A general expression for the shadow geometry for fixed mode horizontal, step-like structure and inclined solar fields," *Solar Energy*, Vol. 181, PP. 53–69, 2019.
- A. Hafez, Y. Nassar, M. Hammdan, and S. Alsadi, "Technical and economic feasibility of utility-scale solar energy conversion systems in Saudi arabia," *Iranian Journal of Science and Technology Transactions of Electrical Engineering*, Vol. 44, PP. 213–225, 2020.
24. H. Bayat and A. Yazdani, "A hybrid MMC-based photovoltaic and battery energy storage system," *IEEE Power and Energy Technology Systems Journal*, Vol. 6, №. 1, PP. 32–40, 2019.
25. M. Kumar, "Solar PV based DC microgrid under partial shading condition with battery- Part 2: energy management system," in *Proceedings of the 2018 8th IEEE India International Conference on Power Electronics (IICPE)*, PP. 1–6, IEEE, Jaipur, India, 2018, December.
26. S. Debnath and M. Chinthavali, "Numerical-stiffness-based simulation of mixed transmission systems," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 65, №. 12, PP. 9215–9224, Dec 2018.