

Міністерство освіти і науки України
Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя

Факультет прикладних інформаційних технологій та електроінженерії
(повна назва факультету)

Кафедра електричної інженерії
(повна назва кафедри)

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на здобуття освітнього ступеня

бакалавр

(назва освітнього ступеня)

на тему: **ВИКОРИСТАННЯ СИСТЕМИ АКУМУЛЮВАННЯ
ЕНЕРГІЇ ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ ЯКОСТІ
ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ ВІД ФОТОЕЛЕКТРИЧНОЇ СТАНЦІЇ**

Виконав студент IV курсу, групи ЕТ-41
спеціальності 141 Електроенергетика, електротехніка та
електромеханіка
(шифр і назва спеціальності)

Горват М.Б.
(прізвище та ініціали)

(підпис)

Керівник

Коваль В.П.

(підпис)

(прізвище та ініціали)

Нормоконтроль

Мовчан Л.Т.

(підпис)

(прізвище та ініціали)

Завідувач кафедри

Коваль В.П.

(підпис)

(прізвище та ініціали)

Рецензент

Голотенко О.С.

(підпис)

(прізвище та ініціали)

Тернопіль
2026

Міністерство освіти і науки України
Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя

Факультет прикладних інформаційних технологій та електроінженерії
(повна назва факультету)
Кафедра електричної інженерії
(повна назва кафедри)

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри
Коваль В.П.
(підпис) (прізвище та ініціали)
« » 2026 р.

ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

на здобуття освітнього ступеня бакалавр
(назва освітнього ступеня)
за спеціальністю 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка
(шифр і назва спеціальності)
студенту Горват Марті Богданівні
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Використання системи акумуляування енергії для підвищення якості електропостачання від фотоелектричної станції

Керівник роботи к.т.н., доц. Коваль В.П.
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

Затверджені наказом ректора від «31» грудня 2025 року № 4/7-1162.

2. Термін подання студентом завершеної роботи до 20.06.2026

3. Вихідні дані до роботи Система акумуляування енергії повинна бути підключена до лінії 10 кВ біля фотоелектричної станції потужністю 100 кВт і працювати з нею для електропостачання споживача

4. Зміст роботи (перелік питань, які потрібно розробити)

1. Фотоелектрична система

2. Проектування структури та імітаційної моделі фотоелектричної системи

3. З'єднання фотоелектричних панелей в поле та їх характеристики

4. Моделювання продуктивності фотоелектричної системи

5. Результати моделювання для PV-САЕЕ

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень, слайдів)

1. Актуальність, мета та завдання

2. Фотоелектричний модуль та масив

3. Структурна схема досліджуваної системи PV-САЕЕ

4. Імітаційна модель запропонованої системи в MATLAB Simulink

5. Система акумуляування енергії (САЕЕ)

6. Моделювання продуктивності фотоелектричної системи

7. Аналіз ефективності інтеграції САЕЕ

8. Загальні висновки

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
<i>Безпека життєдіяльності, основи охорони праці</i>	<i>Гурик О.Я. к.т.н., доцент кафедри МТ</i>		
<i>Нормоконтроль</i>	<i>Мовчан Л.Т., к.т.н., доц. кафедри ЕІ</i>		

7. Дата видачі завдання _____ 02.01.2026 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	Аналітичний огляд за напрямком кваліфікаційної роботи	з 19.04.2026 по 25.04.2026	
2	Підготовка основної частини пояснювальної записки кваліфікаційної роботи	з 25.04.2026 по 21.05.2026	
3	Підготовка розділу «Безпека життєдіяльності, основи охорони праці»	з 21.05.2026 по 23.05.2026	
4	Складання переліку використаних літературних джерел	з 23.05.2026 по 24.05.2026	
5	Підготовка вступу, висновків, змісту, реферату	з 24.05.2026 по 28.05.2026	
6	Підготовка, оформлення та друк графічного матеріалу кваліфікаційної роботи	з 28.05.2026 по 01.06.2026	
7	Отримання відгуку та рецензії на кваліфікаційну роботу, підготовка доповіді на захист	з 01.06.2026 по 05.06.2026	

Студент _____
(підпис)

Горват М.Б.
_____ (прізвище та ініціали)

Керівник роботи _____
(підпис)

Коваль В.П.
_____ (прізвище та ініціали)

РЕФЕРАТ

Кваліфікаційна робота бакалавра. Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя. Факультет прикладних інформаційних технологій та електроінженерії. Кафедра електричної інженерії, група ЕТ–41. – Т. : ТНТУ, 2026.

Кваліфікаційна робота бакалавра виконана на підставі завдання на тему: «Використання системи акумулювання енергії для підвищення якості електропостачання від фотоелектричної станції».

Метою роботи є дослідження можливостей використання системи акумулювання енергії для підвищення якості та надійності електропостачання від фотоелектричної станції

У роботі проведено аналіз сучасного стану розвитку фотоелектричної енергетики. Досліджено склад, принципи роботи та основні характеристики систем акумулювання електричної енергії на основі літій-іонних акумуляторів. Описано імітаційні моделі комбінованої фотоелектричної системи з системою акумулювання енергії у середовищі MATLAB Simulink, включаючи моделі PV-масиву, підвищувальний перетворювач, інвертор, контролер MPPT, акумуляторну батарею, двонаправлений перетворювач Кука та систему управління. Досліджено роботу об'єднаної системи PV–САЕЕ у різних режимах: стаціонарному, зі змінними умовами інсоляції, а також у сценаріях зарядження/розрядження акумуляторної батареї, і оцінити вплив системи на якість електропостачання. Здійснено оцінку ефективності інтеграції САЕЕ з фотоелектричною установкою та виявити переваги та недоліки запропонованої конфігурації.

Ключові слова: АКУМУЛЮВАННЯ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ, ФОТОЕЛЕКТРИЧНА СТАНЦІЯ, ЯКІСТЬ ТА НАДІЙНІСТЬ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ

ЗМІСТ

ВСТУП

1 АНАЛІТИЧНИЙ РОЗДІЛ.....	9
1.1 Фотоелектрична система	9
1.2 Вплив температури та інтенсивності сонячного випромінювання на фотоелектричну комірку.....	13
1.3 Фотоелектричний модуль та масив	14
1.4 Фотоелектрична система, підключена до електромережі.....	17
1.5 Хімічні акумулятори електроенергії	18
1.6 Висновки до розділу	20
2 ПРОЕКТНО-КОНСТРУКТОРСЬКИЙ РОЗДІЛ.....	22
2.1 Середовище моделювання MATLAB Simulink.....	22
2.2 Проектування структури та імітаційної моделі фотоелектричної системи	22
2.3 Імітаційні моделі, які використані для моделювання запропонованої системи	26
2.3.1 Модель PV-масиву	26
2.3.2 Перетворювач постійного струму	27
2.3.3 Відстеження точки максимальної потужності (MPPT).....	28
2.3.4 Інвертор	30
2.3.5 Контролер інвертора	31
2.3.6 Трансформатор	32
2.3.7 Система акумуляування електроенергії (CAEE)	32
2.3.8 Акумуляторна батарея	33
2.3.9 Перетворювач постійного струму (перетворювач Кука).....	34
2.3.10 Інвертор постійного струму в змінний (VSC).....	36
2.4 Висновки до розділу	36
3 РОЗРАХУНКОВИЙ РОЗДІЛ	38

3.1 З'єднання фотоелектричних панелей в поле та їх характеристики	38
3.2 Моделювання продуктивності фотоелектричної системи	41
3.2.1 Стаціонарна продуктивність фотоелектричної панелі	42
3.2.2 Продуктивність фотоелектричної панелі за різних умов експлуатації.....	46
3.2.3 Результати моделювання для PV-САЕЕ	48
3.7 Висновки до розділу	56
4 БЕЗПЕКА ЖИТТЄДІЯЛЬНОСТІ, ОСНОВИ ОХОРОНИ ПРАЦІ	58
4.1 Основні вимоги безпеки до улаштування та експлуатації технологічного обладнання.....	58
4.2 Заходи безпеки при монтажі енергоустановок	59
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ	62
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ	64

ВСТУП

Актуальність теми.

Останнім роками світ спостерігається на перехід від традиційних джерел енергії до відновлюваних. Україна, як і інші країни європейського союзу, здійснює політику енергетичного переходу та активно розвиває відновлювану енергетику. Серед різних технологій відновлюваної енергетики фотоелектричні станції (ФЕС) займають одне із найбільш провідних місць, оскільки сонячна енергія є майже універсальною та доступною на більшій території.

Фотоелектричні системи зазвичай залежать від інтенсивності сонячного випромінювання та температури навколишнього середовища, що призводить до переривчастості їх роботи та нестабільності потужності, яка подається до електромережі. Це створює серйозні проблеми для електромереж та споживачів, оскільки перерви відновлюваної енергії можуть призвести до змін частоти та напруги у мережі, зниження якості електроенергії та навіть до виходу з ладу окремих її елементів.

Для вирішення цієї проблеми широко застосовуються системи акумулювання електричної енергії (САЕЕ). Інтеграція САЕЕ з фотоелектричними станціями дозволяє зберігати надлишкову енергію під час пікового навантаження та використовувати її пізніше при зниженій інсоляції або відсутності сонячного випромінювання, що значно підвищує якість електропостачання. Крім того, використання САЕЕ дає змогу зменшувати навантаження на електромережу, збільшувати енергетичну незалежність об'єктів та скорочувати терміни окупності інвестицій.

Українська енергетична система переживає значні зміни внаслідок агресивних подій та військової агресії, що змушує її стійкість та збільшує потребу у додаткових джерелах генерації. У цьому контексті розвиток автономних фотоелектричних систем з системами акумулювання є крайне актуальним напрямком, який дозволяє підвищити енергетичну безпеку окремих

об'єктів, зменшити залежність від централізованих джерел електропостачання та забезпечити безперервне живлення критичної інфраструктури.

Сучасні дослідження у галузі моделювання фотоелектричних систем з акумуляторними підсистемами показують, що такі комплекси можуть бути ефективно інтегровані у існуючу електромережу та працювати як енергонезалежний джерело електроенергії для окремих споживачів чи невеликих поселень. Тому дослідження можливостей використання САЕЕ для підвищення якості електропостачання від фотоелектричних станцій є актуальною та науково перспективною задачею.

Метою кваліфікаційної роботи є дослідження можливостей використання системи акумуляування енергії для підвищення якості та надійності електропостачання від фотоелектричної станції.

Відповідно до даної мети ставляться такі завдання:

1. Проаналізувати сучасний стан розвитку фотоелектричної енергетики.
2. Дослідити склад, принципи роботи та основні характеристики систем акумуляування електричної енергії на основі літій-іонних акумуляторів.
3. Описати імітаційні моделі комбінованої фотоелектричної системи з системою акумуляування енергії у середовищі MATLAB Simulink, включаючи моделі PV-масиву, підвищувальний перетворювач, інвертор, контролер MPPT, акумуляторну батарею, двонаправлений перетворювач Кука та систему управління.
4. Дослідити роботу об'єднаної системи PV–САЕЕ у різних режимах: стаціонарному, зі змінними умовами інсоляції, а також у сценаріях зарядження/розрядження акумуляторної батареї, і оцінити вплив системи на якість електропостачання;
5. Здійснити оцінку ефективності інтеграції САЕЕ з фотоелектричною установкою та виявити переваги та недоліки запропонованої конфігурації.
6. Описати основні заходи безпеки життєдіяльності та охорони праці.

Практичне значення. Результати, отримані у ході виконання даної кваліфікаційної роботи, можуть бути використані при проектуванні і

модернізації фотоелектричних станцій з системами акумулювання енергії для об'єктів різного призначення: житлових, промислових, сільськогосподарських та інших.

Основним практичним результатом роботи є функціональна модель комбінованої системи «фотоелектрична станція – система акумулювання електричної енергії», реалізована у середовищі MATLAB/Simulink, яка дозволяє: аналізувати перехідні процеси у різних режимах роботи; оцінити ефективність алгоритму МРРТ та системи управління; визначити оптимальні параметри акумуляторної батареї для конкретних умов експлуатації.

Отримані у роботі результати можуть знадобитися при проектуванні автономних енергопостачальних систем для об'єктів, які не можуть бути під'єднані до централізованої мережі, а також як базу для подальшого вдосконалення технічних рішень та оптимізації систем керування.

Структура роботи. Робота складається з розрахунково-пояснювальної записки та графічної частини. Розрахунково-пояснювальна записка складається з вступу, 4 частин, висновків та переліку посилань. Обсяг роботи: розрахунково-пояснювальна записка – 67 арк. формату А4, графічна частина – 20 аркушів презентації.

Кваліфікаційна робота виконана відповідно до вимог [1]. Результати частково апробовані у тезах конференції [2].

1 АНАЛІТИЧНИЙ РОЗДІЛ

1.1 Фотоелектрична система

Фотоелектрична енергетика — це технологія, яка дозволяє безпосередньо перетворювати сонячну енергію в електричну. Пристрій на основі напівпровідникового матеріалу, що використовується для перетворення сонячної енергії в електричну, називається сонячною батареєю або фотоелектричною коміркою. Фізичне явище перетворення сонячної енергії в електричну також відоме як фотоелектричний ефект, який вперше був спостережений Беккерелем у 1839 році.

Фотоелектрична система — це комбінація фотоелектричних модулів, з'єднаних послідовно та паралельно для досягнення заданої напруги, струму та потужності [3]. Фотоелемент складається з напівпровідникових матеріалів, таких як кремній або германій. Типовий фотоелемент складається з напівпровідникових матеріалів n-типу та p-типу, що мають різні електричні властивості [4-6]. Коли фотоелектрична комірка поглинає фотон сонячного світла, на позитивних і негативних переходах напівпровідникового блоку утворюються вільні електрони і дірки, що генерують постійний струм. Структура базової фотоелектричної комірки показана на рисунку 1.1, енергія, що генерується фотоелектричними комірками, збирається через металеві контакти, підключені з обох боків комірки.

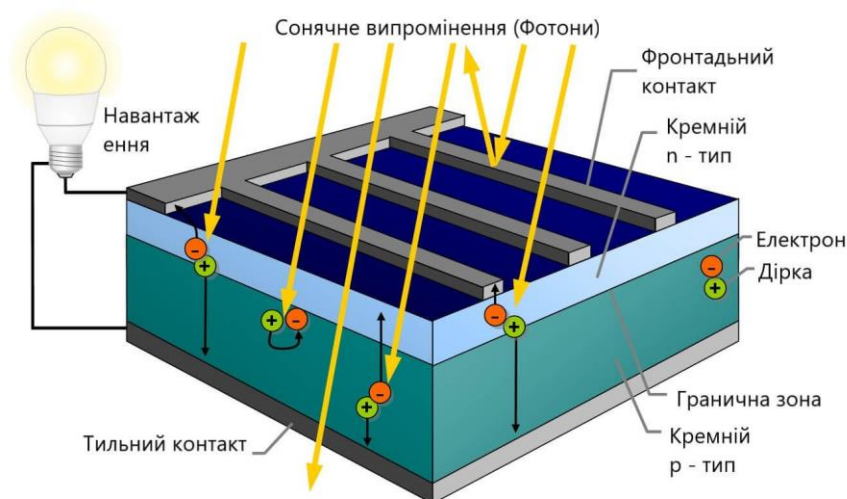


Рисунок 1.1 – Структура фотоелектричної комірки

Вихідна потужність фотоелектричної комірки за різних умов експлуатації, яка зазвичай представлена кривою V-I та кривою P-V [7,8], показана на рис. 1.2, де V_{oc} — напруга розімкнутого кола, I_{sc} — струм короткого замикання, а $V_{mp}I_{mp}$ — максимальна напруга та струм у точці максимальної потужності.

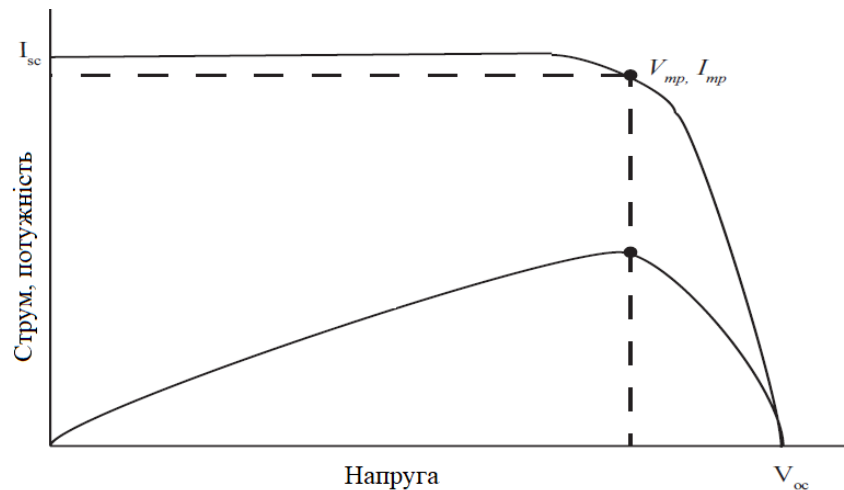


Рисунок 1.2 – Типова крива I-V та P-V фотоелектричної комірки [8]

Для моделювання фотоелектричної комірки важливо розуміти властивості I-V характеристик. Постійний струм, що генерується фотоелектричною коміркою, зазвичай позначається як

$$I = I_L - I_0 \left[\exp\left(\frac{qV}{nkT}\right) - 1 \right], \quad (1.1)$$

де I_L – струм короткого замикання;

I_0 – струм насичення;

V – напруга фотоелектричної комірки;

k – постійна Больцмана;

q – заряд електрона;

T – температура.

Електрична модель однодіодної фотоелектричної комірки представлена на рисунку 1.3.

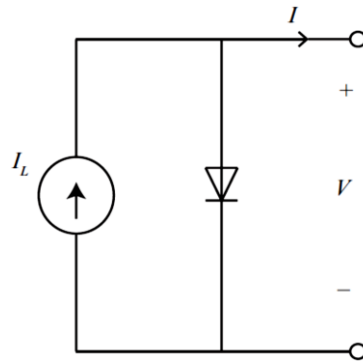


Рисунок 1.3 – Один діод фотоелектричної комірки [8]

Струм короткого замикання — це максимальний струм, доступний при нульовій напрузі, а напруга розімкнутого кола (V_{oc}) — це максимальна напруга, що досягається при нульовому струмі, і напруга розімкнутого кола задається як

$$V_{oc} = \frac{nkT}{q} \ln \left(\frac{I_L}{I_0} + 1 \right) \quad (1.2)$$

Коефіцієнт заповнення також є одним з основних параметрів, що вимірюють продуктивність фотоелектричної комірки та якість переходу, і визначається як

$$F_F = \frac{V_{mp} I_{mp}}{V_{oc} I_{sc}} \quad (1.3)$$

Ідеальне значення коефіцієнта заповнення сонячної комірки дорівнює 1, що визначає найвищу якість фотоелектричної комірки. Через наявність паразитних елементів у фотоелектричній комірці значення коефіцієнта заповнення зменшується. Схема фотоелектричної комірки з паразитними елементами показана на рисунку 1.4.

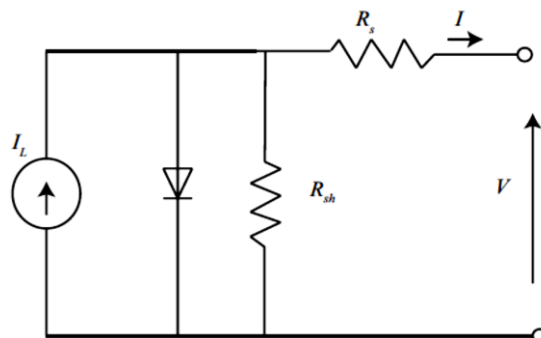


Рисунок 1.4 – Один діод фотоелектричної комірки з паразитними елементами

Практичні фотоелектричні комірки також містять паразитні елементи, послідовний опір (R_s) і шунтовий опір (R_{sh}). Наявність шунтового опору обумовлена домішками поблизу р-п-переходу, а послідовний опір обумовлений високим опором металевих контактів, міжз'єднань і напівпровідникового матеріалу. Бажано, щоб значення шунтового опору було вищим, оскільки це підвищує продуктивність фотоелектричної комірки, а нижче значення послідовного опору збільшує вихідну потужність фотоелектричної комірки, як показано на рисунку 1.5.

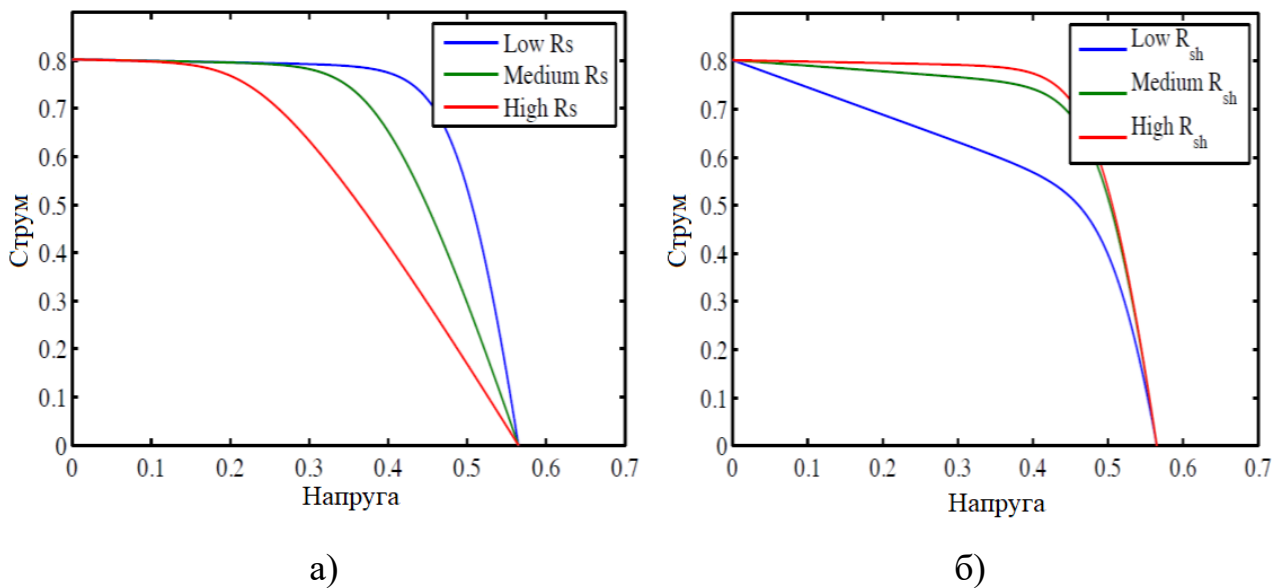


Рисунок 1.5 – Вплив послідовного (а) та шунтуючого (б) опору на V-I криву сонячної комірки

Наявність шунтового та послідовного опору в V-I характеристиках фотоелектричної комірки визначається за формулою:

$$I = I_L - I_0 \left[\exp \left(\frac{V + IR_s}{\frac{nkT}{q}} \right) - 1 \right] - \frac{V + IR_{sh}}{R_{sh}} \quad (1.4)$$

1.2 Вплив температури та інтенсивності сонячного випромінювання на фотоелектричну комірку

На продуктивність фотоелектричної комірки впливають такі фактори навколишнього середовища, як температура та інтенсивність сонячного випромінювання [4,7,9,10]. У цьому підрозділі описано залежність продуктивності фотоелектричної комірки від обох факторів. Струм короткого замикання має майже лінійну залежність від інтенсивності сонячного випромінювання на комірку. Збільшення інтенсивності сонячного випромінювання збільшує струм короткого замикання фотоелектричної комірки і навпаки [11].

$$I_{SG} \ G = \left(\frac{G}{G_o} \right) \cdot I_{SC} G_o \quad (1.5)$$

де G_o – еталонний рівень інсоляції,

G – інсоляція, що падає на фотоелемент. Залежність інсоляції та температури також проілюстровано на рисунку 1.6.

Очевидно, що температура навколишнього середовища впливає на робочі характеристики фотоелектричної комірки. Збільшення температури дещо збільшує струм розімкнутого кола через вузьку ширину забороненої зони, але значно зменшує напругу короткого замикання. Залежність кристалічної кремнієвої сонячної комірки від температури задається формулою

$$I_{SC} \ T = I_{SC.REF} + 0,006 \frac{A}{K} (T - T_{REF}) \quad (1.6)$$

А залежність напруги розімкнутого кола від температури виражається формулою [12]

$$V_{OC} \ T = \frac{E_{go}}{q} - \frac{kT}{q} \ln \left(\frac{BT^\gamma}{I_{SC}} \right) \quad (1.7)$$

де γ – залежна від температури величина струму насичення в темряві;

B – константа, незалежна від температури;

E_{go} – лінійно екстрапольована енергія забороненої зони напівпровідника при нульовій температурі.

За приблизними оцінками, підвищення температури кремнієвої комірки на кожен градус Цельсія зменшує вихідну потужність на 0,5 %. Залежність температури та інтенсивності сонячного випромінювання від V-I характеристик фотоелектричної комірки показана на рисунку 1.6

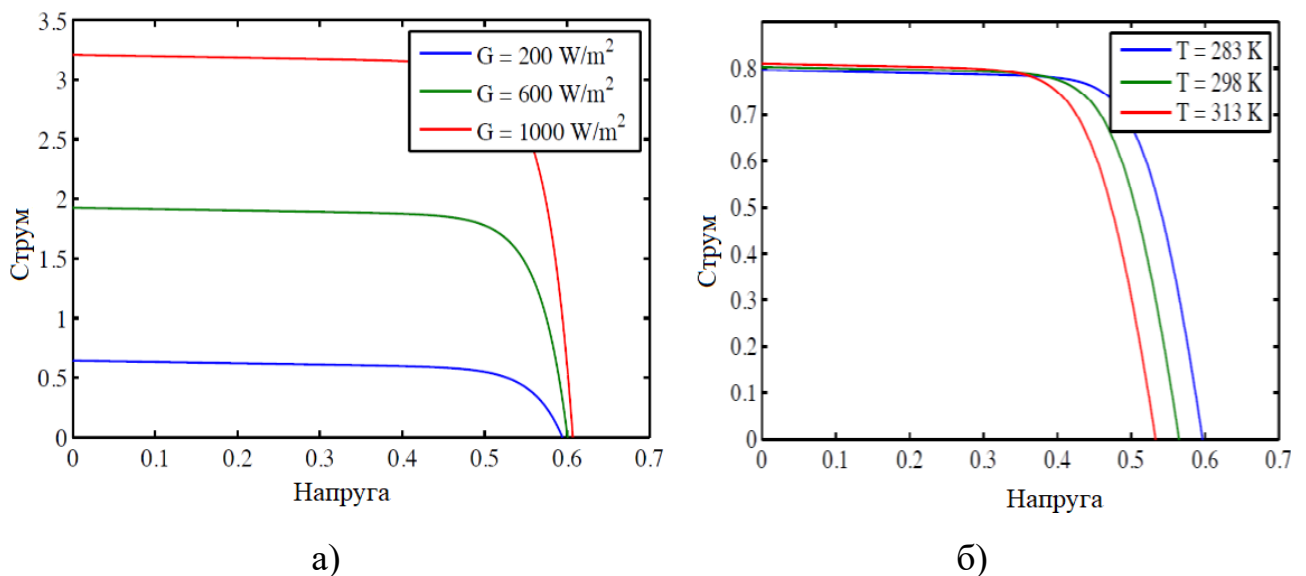


Рисунок 1.6 – Вплив інтенсивності сонячного випромінювання (а) та температури (б) на V-I характеристики фотоелектричної комірки [8].

1.3 Фотоелектричний модуль та масив

Типова фотоелектрична комірка генерує менше 3 Вт потужності при 0,5 В постійного струму, тому вона не використовується для більшості практичних застосувань. Кілька фотоелектричних елементів, з'єднаних паралельно-послідовно, генерують потужність, придатну для більшості застосувань, і відомі як фотоелектричні модулі [13-16]. Окремі елементи зазвичай (36 або 72) з'єднуються послідовно, щоб досягти бажаної вихідної напруги.

Типове розташування 36 фотоелектричних елементів, з'єднаних послідовно, показано на рисунку 1.7. У цій комбінації напруга на клеммах є

сумою напруг усіх окремих фотоелектричних елементів, а струм є однаковим для всіх елементів. При паралельному з'єднанні фотоелектричних елементів вихідна напруга на кожному елементі однакова, а вихідний струм дорівнює сумі струмів окремих елементів [11].

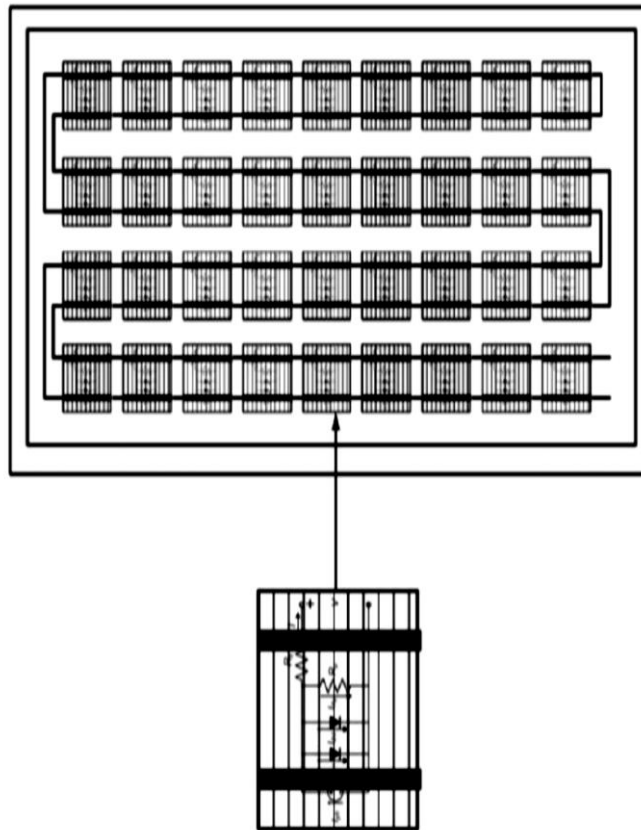


Рисунок 1.7 – Структура фотоелектричного модуля з 36 елементами, з'єднаними послідовно

Коли фотоелектричні елементи з'єднані послідовно, можливе повне або часткове затінення елементів, що погіршує продуктивність модуля в цілому. Затінена комірка може бути піддана зворотній поляризації і діяти як навантаження, а не як генератор. Як показано на рисунку 1.8, байпасний діод підключається в антипаралельному поєднанні до окремої комірки або набору комірок, щоб уникнути негативного впливу затіненої комірки на весь модуль [11].

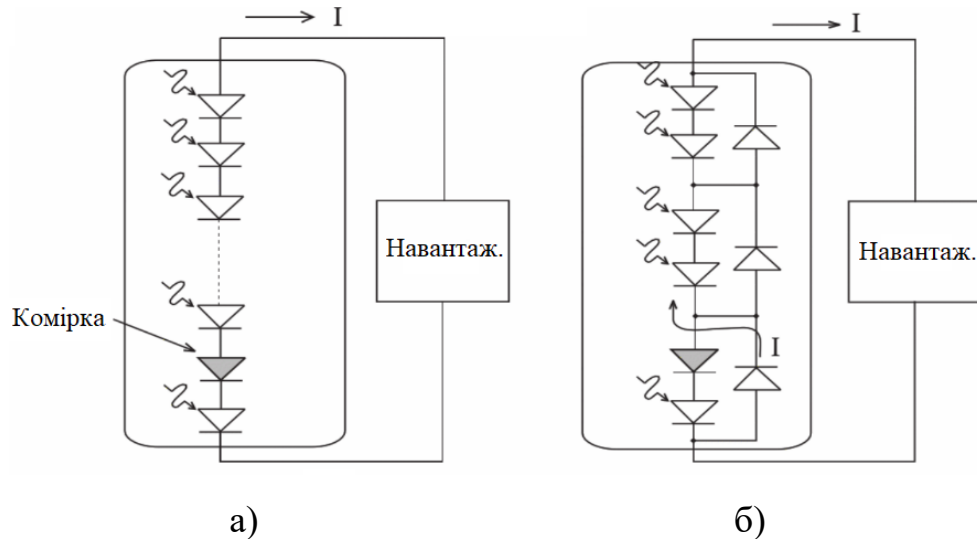


Рисунок 1.8 – Фотоелектричний модуль (а) комірки без байпасного діода
(б) комірки з байпасним діодом [11]

Фотоелектрична батарея — це комбінація фотоелектричних модулів, з'єднаних електрично, встановлених на одній пластині для генерації необхідної вихідної потужності для певного застосування. Фотоелектричні модулі з'єднуються послідовно для збільшення напруги фотоелектричної панелі і паралельно для збільшення струму системи. Типова послідовно-паралельна комбінація фотоелектричних модулів показана на рисунку 1.9.

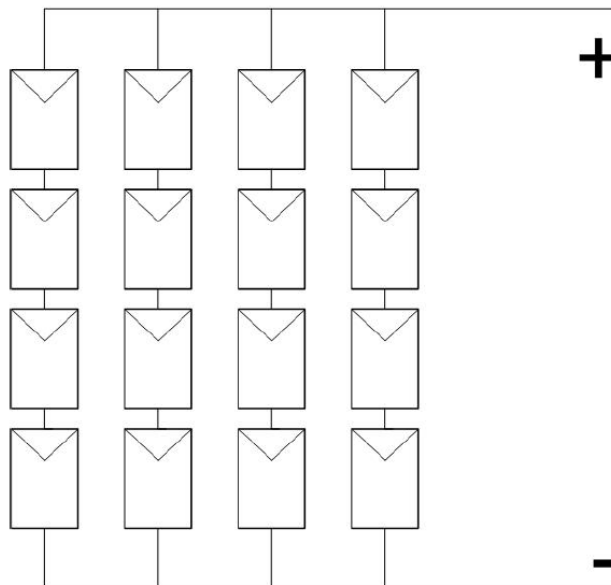


Рисунок 1.9 – Послідовно-паралельне поєднання фотоелектричних модулів для формування фотоелектричної матриці

1.4 Фотоелектрична система, підключена до електромережі

Енергія, що генерується фотоелектричною системою і подається в електромережу, називається фотоелектричною системою, підключеною до електромережі. Фотоелектричні генератори виробляють постійний струм, для підключення до електромережі необхідні певні інтерфейси. Інвертори використовуються у випадку фотоелектричних генераторів для перетворення постійного струму в змінний для підключення до електромережі. Залежно від інтерфейсу мережі, фотоелектричні генератори можуть бути сконфігуровані різними способами, як показано на рисунку 1.10, деякі з них – це технологія стрінгів (кіл), централізована технологія [17].

Традиційна конфігурація – це централізована технологія, як показано на рисунку 1.10(а), де велика кількість фотоелектричних модулів підключена до електромережі через інвертор. Струни фотоелектричних модулів підключені паралельно через захисний діод. Централізована технологія чутлива до втрат через невідповідність і часткове затінення [9].

Кожне коло (стрінг) фотоелектричних модулів з окремим інвертором підключається до мережі, як показано на рисунку 1.10(б). Вона менш чутлива до втрат постійного струму і часткового затінення. Вона має гнучкість для додавання нових кіл до системи.

Багатострінгова технологія є поєднанням централізованої та однострінгової технології, як показано на рис. 1.10с. Вона має переваги обох технологій. Система є модульною, до неї легко додати інший стрінг, і вона має майже нульові втрати постійного струму [9].

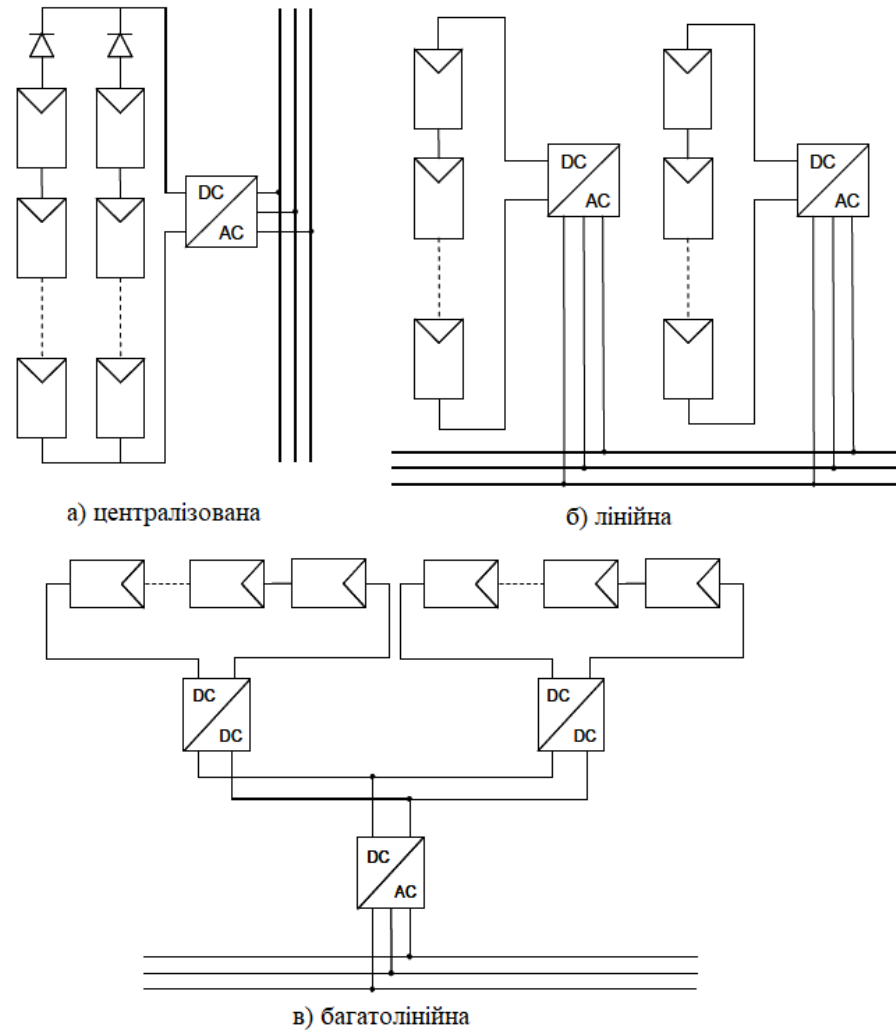


Рисунок 1.10 – Різні конфігурації підключених до мережі фотоелектричних генераторів

1.5 Хімічні акумулятори електроенергії

Серед різних комерційно доступних методів зберігання електричної енергії акумулятори, мабуть, є найбільш досконалими. Завдяки постійному розвитку цієї технології акумулятори відіграють важливу роль у зберіганні електричної енергії, особливо коли енергія генерується з відновлюваних джерел енергії, які нестабільні в часі [18-21]. Акумулятори зберігають і вивільняють енергію за допомогою електрохімічних реакцій: коли електрична енергія перетворюється на хімічну, акумулятор перебуває в режимі заряджання (він зберігає енергію). Хімічна сполука всередині акумулятора діє як носій інформації. У режимі розряджання збережена хімічна енергія перетворюється

на електричну.

Елемент, елементарна одиниця акумулятора, складається з чотирьох основних компонентів:

1. Додатній електрод або катод (під час реакції розрядження) окислюється, поглинаючи електрони з зовнішнього контуру, або окислюється (під час реакції зарядження), подаючи електрони до зовнішнього контуру.

2. Від'ємний електрод або анод (під час реакції розрядження) окислюється, подаючи електрони через зовнішній контур, або окислюється (під час реакції зарядження), приймаючи електрони з зовнішнього контуру. Електрод через свою форму також може називатися позитивною або негативною пластиною.

3. Електроліт — це матеріал, який проводить електричний струм, розділяючи заряджені частинки, які називаються іонами, на позитивні (аніони) і негативні (катіони). Електролітом для проведення струму може бути як кислий, так і лужний розчин.

4. Сепаратор зазвичай використовується для ізоляції електричного шляху між додатними і від'ємними пластинами.

Типова конструкція САЕЕ на основі Li-ion акумулятора показана на рисунку 1.11



Рисунок 1.11 – Типова конструкція САЕЕ

1.6 Висновки до розділу

1. Даному розділі кваліфікаційної роботи проведено теоретичний аналіз фотоелектричної енергетики як перспективного напрямку відновлюваної енергетики. Розглянуто фізичні основи фотоелектричного ефекту, принципи перетворення сонячної енергії в електричну напівпровідниковими комірками, структуру та основні параметри фотоелектричної комірки, зокрема її вольт-амперні та потужнісні характеристики. Наведено математичну модель однодіодної фотоелектричної комірки з урахуванням паразитних елементів (послідовного та шунтового опорів), що дозволяє оцінити реальну продуктивність пристрою.

2. Проаналізовано вплив зовнішніх факторів — температури навколишнього середовища та інтенсивності сонячного випромінювання — на робочі характеристики фотоелектричної комірки. Встановлено, що збільшення інсоляції лінійно підвищує струм короткого замикання, тоді як підвищення температури призводить до зменшення напруги розімкненого кола та загального зниження вихідної потужності приблизно на 0,5 % на кожен градус Цельсія.

3. Розглянуто питання об'єднання окремих фотоелектричних комірок у модулі та масиви для отримання необхідних рівнів напруги, струму та потужності. Показано негативний вплив часткового затінення на продуктивність послідовно з'єднаних комірок та роль байпасних діодів у захисті модуля від зворотної поляризації. Описано основні конфігурації фотоелектричних систем, підключених до електромережі: централізовану, стінгову та багатострінгову технології, з виокремленням їх переваг та недоліків з точки зору чутливості до невідповідності параметрів і часткового затінення.

4. Окремо висвітлено роль акумуляторних систем у забезпеченні надійності роботи фотоелектричних установок, розглянуто їх складові компоненти та принципи збереження електроенергії шляхом зворотних

електрохімічних реакцій. Отримані теоретичні положення створюють підґрунтя для подальшого моделювання та проєктування конкретної фотоелектричної системи, що розглядається в наступних розділах даної кваліфікаційної роботи.

2 ПРОЕКТНО-КОНСТРУКТОРСЬКИЙ РОЗДІЛ

2.1 Середовище моделювання MATLAB Simulink

MATLAB Simulink широко використовується для моделювання PV-САЕЕ (системи акумулювання електричної енергії). Simulink — це надзвичайно гнучка платформа для моделювання та розрахунків, яка надає можливість проектувати моделі. Для цієї роботи було використано кілька наборів інструментів з MATLAB Simulink для моделювання різних компонентів, що дозволяють тестувати фотоелектричну систему в різних умовах випробувань. Реалізація цієї системи в Simulink полегшила моделювання, наприклад, дозволила моделювати значення інтенсивності сонячного випромінювання (та його зміни), що обчислювати вихідний струм, вироблений фотоелектричним модулем.

2.2 Проектування структури та імітаційної моделі фотоелектричної системи

Далі наведено методи моделювання та керування, що застосовуються до всіх компонентів комбінованої системи PV- САЕЕ, запропонованої в цій роботі. Дві основні підсистеми складеної PV- САЕЕ показані на рисунку 2.1, а саме: (а) підсистема PV, що складається з перетворювача постійного струму в постійний струм і системи управління МРРТ, у поєднанні з перетворювачем постійного струму в змінний струм з відповідною системою управління VSC; (б) підсистема акумуляції енергії в акумуляторних батареях, що складається з двонаправленого перетворювача постійного струму в постійний струм (Cuk) у поєднанні з інвертором постійного струму в змінний струм (VSC). Кожна підсистема підключається до точки загального з'єднання з мережею змінного струму та точки навантаження, як показано на рисунку 2.1.

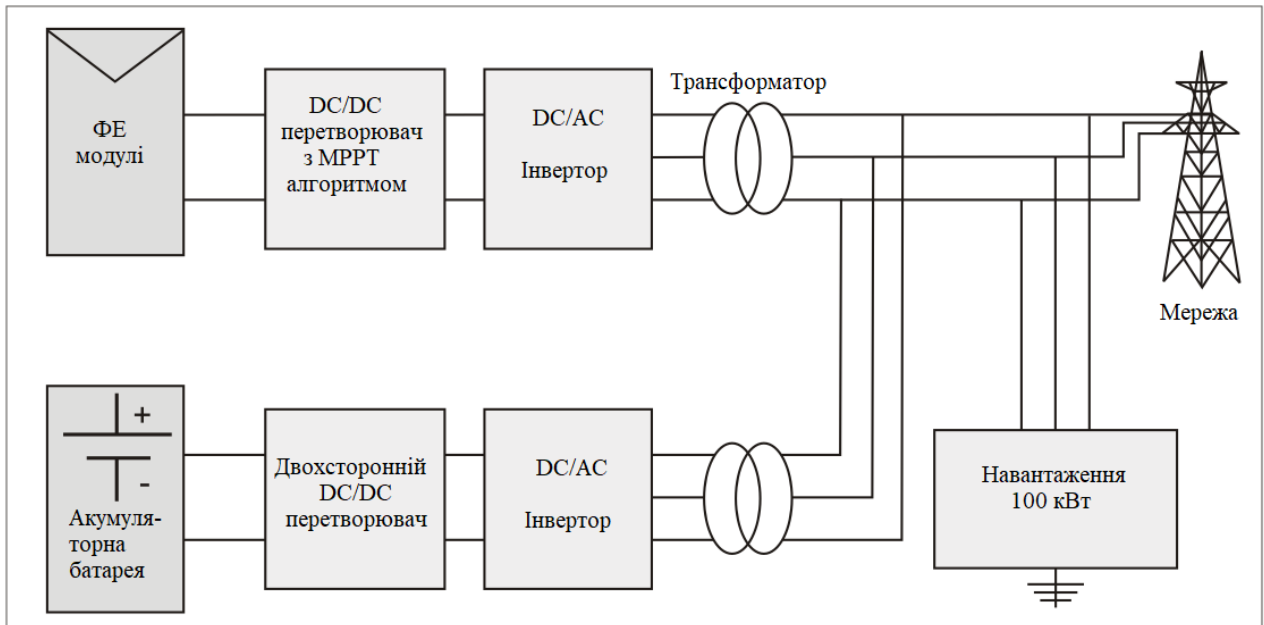


Рисунок 2.1 – Запропонована система PV-САЕЕ.

У цій роботі розглядається базова модель, описана в [22], як показано на рисунку 2.2. Фотоелектрична батарея потужністю 100 кВт підключена до навантаження та мережі змінного струму через підвищувальний перетворювач постійного струму та 3-фазний 3-рівневий інвертор (VSC), за яким слідує 3-фазний трансформатор.

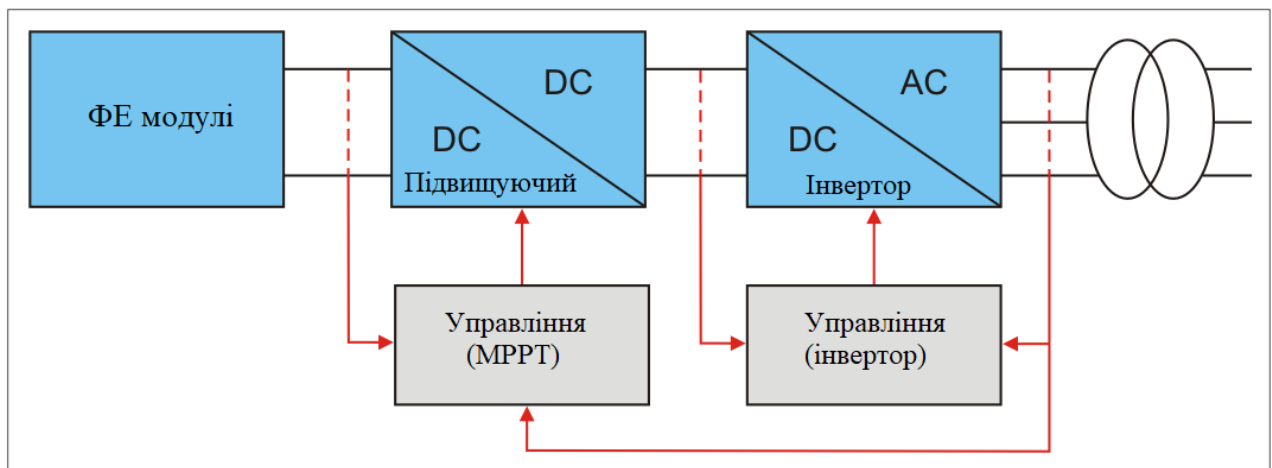


Рисунок 2.2 – Моделювання фотоелектричної системи.

Опис усіх компонентів наведено в таблиці 2.1.

Таблиця 2.1 – Компоненти, використані в моделюванні фотоелектричної системи

Компоненти	Короткий опис
Фотоелектрична батарея	Здатна виробляти 100 кВт при STC (1000 Вт/м ² при 25 °C)
Підвищувальний перетворювач постійного струму (5 кГц)	Використовується для підвищення напруги вихідної потужності фотоелектричної системи (273 В постійного струму) до 500 В постійного струму. Контролер MPPT оптимізує робочий цикл підвищувального перетворювача.
3-рівневий 3-фазний інвертор постійного струму типу VSC	Інвертор постійного струму в змінний струм, здатний перетворювати напругу 500 В постійного струму в 230 В змінного струму. Коефіцієнт потужності підтримується на рівні 1 (один). Він працює за допомогою двох контурів управління. Зовнішній контур управління контролює напругу кола постійного струму до +/- 250 В. Внутрішній контур управління регулює активні та реактивні складові струму.
Банк конденсаторів 10 кВАр	Він здатний фільтрувати гармоніки, що створюються інвертором VSC

2.3 Імітаційні моделі, які використані для моделювання запропонованої системи

2.3.1 Модель PV-масиву

Хоча моделювання PV-масиву можна виконати в Simulink за допомогою компонентів SunPower, MATLAB має вбудований блок PV-масиву, який можна використовувати. PV-масив складається з 330 сонячних модулів, які забезпечують 100,7 кВт за стандартних умов випробування (СУВ). Компонування фотоелектричної панелі складається з 66 паралельних кіл, де кожен коло має 5 послідовно з'єднаних модулів SunPower (зі специфікацією SPR-305E-WHT-D). Фотоелектрична батарея має оптимальну потужність $66 \cdot 5 \cdot 305,2 \text{ Вт} = 100,7 \text{ кВт}$ при $25 \text{ }^\circ\text{C}$.

Схема масиву показана на рисунку 2.4. Зверніть увагу, що кожний стрінг має 5 модулів. Таких стрінгів є 66. Загальна потужність розраховується як $66 \cdot 5 \cdot 305,2 \text{ Вт} = 100,7 \text{ кВт}$.

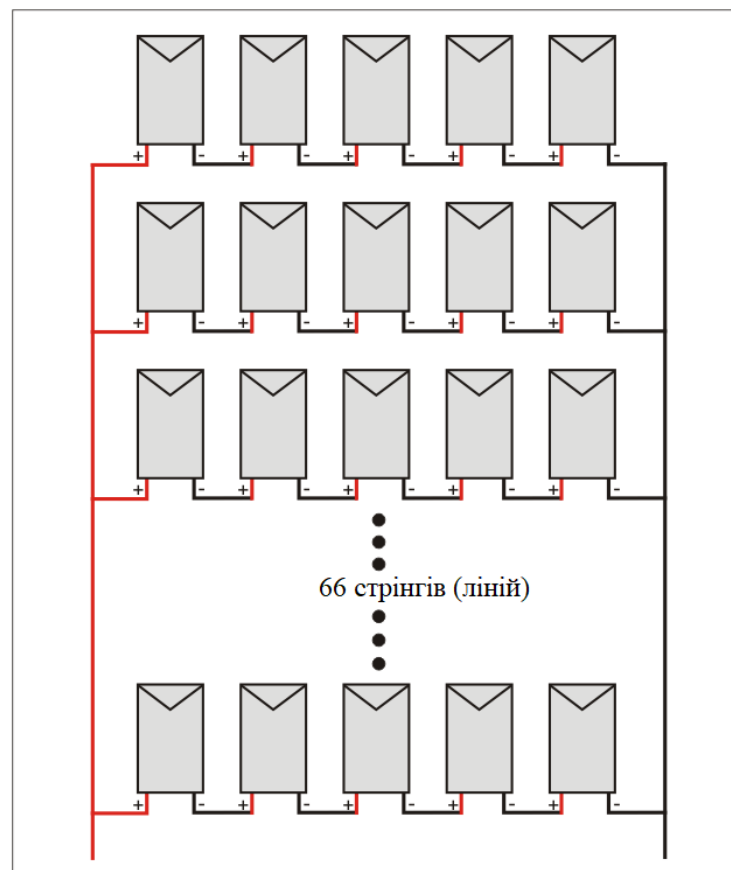


Рисунок 2.4 – Послідовне та паралельне з'єднання фотоелектричних

модулів для формування фотоелектричного масиву потужністю 100 кВт

2.3.2 Перетворювач постійного струму

У цій роботі використовується підвищувальний перетворювач. Він має діод, який блокує зворотний струм і підсилює вихідну напругу фотоелектричних масивів до більш високого рівня (рис. 2.5). Управління перетворювачем постійного струму здійснюється за допомогою ширини імпульсної модуляції (ШІМ) робочого циклу. Зверніть увагу, що стан транзистора визначає вихід перетворювача. Оптимальний імпеданс навантаження фотоелектричної панелі досягається шляхом зміни робочого циклу. Підвищувальний перетворювач постійного струму підвищує вхідну напругу, зберігаючи енергію в індукторі протягом певного періоду часу. Потім він використовує цю накопичену енергію для підвищення вхідної напруги до більш високого рівня.

Електрична схема підвищувального перетворювача, що використовується в цій роботі, була змодельована, як показано на рисунку 2.5.

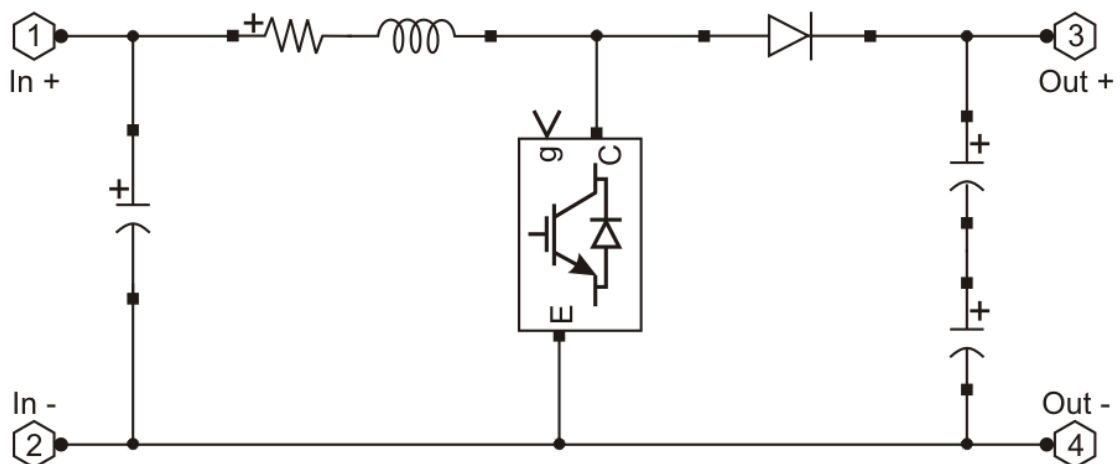


Рисунок 2.5 – Моделювання підсилювача напруги

Джерело вхідного сигналу заряджає котушку індуктивності, коли перемикач закритий. Діод має зворотну полярність — ця методика використовується для забезпечення ізоляції між входом і виходом

перетворювача. Коли перемикач відкритий, енергія, накопичена в котушці індуктивності та джерелі живлення, передається на навантаження. Співвідношення вихідної напруги та вхідної напруги визначається як:

$$\text{Вихідна напруга} / \text{вхідна напруга} = \frac{1}{1-d}, \text{ де } d \text{ — робочий цикл.}$$

Моделювання підсилювача реалізовано за допомогою інструментів SimPower systems, які є частиною бібліотеки simscape. Бібліотеки SimPower systems складаються з низки базових компонентів, необхідних для побудови підсилювача напруги. З точки зору зусиль і часу, моделювання підсилювача напруги є простим. Моделювання дозволило легко додавати нові блоки або змінювати властивості існуючих блоків.

2.3.3 Відстеження точки максимальної потужності (MPPT)

Вихідна потужність фотоелектричної панелі сильно залежить від положення Сонця і напрямку сонячних променів (наприклад, інсоляції). З огляду на криву потужності в залежності від напруги сонячних модулів/панелей, на цій кривій існує тільки одна максимальна потужність, що відповідає бажаному значенню струму і напруги, і використовується техніка відома як відстеження точки максимальної потужності (MPPT).

Існує кілька методів MPPT з різною продуктивністю, але ми використали метод інкрементальної провідності та інтегрального регулятора.

Метод інкрементальної провідності побудований на порівнянні та вимірюванні миттєвої провідності та інкрементальної провідності. Він також визначає відхилення в напрямку напруги. Диференціювання кривої потужності та напруги отримується за допомогою наступних рівнянь:

$$\frac{\partial P}{\partial V} = \frac{\partial VI}{\partial V} = I \frac{\partial V}{\partial V} + V \frac{\partial I}{\partial V} = I + V \frac{\partial I}{\partial V} \quad (2.1)$$

$$\frac{\partial P}{\partial V} = 0 \quad (2.2)$$

$$I + V \frac{\partial I}{\partial V} = 0 \quad (2.3)$$

$$\frac{\partial I}{\partial V} = -\frac{I}{V} \quad (2.4)$$

де $\frac{I}{V}$ – означає миттєву провідність фотоелектричної панелі,

$\frac{\partial I}{\partial V}$ -миттєву зміну провідності.

Максимальна точка потужності фотоелектричної системи може бути визначена шляхом порівняння величин, наведених у (2.5).

$$\begin{cases} \frac{\partial P}{\partial V} > 0, V < V_{mpp} \\ \frac{\partial P}{\partial V} = 0, V = V_{mpp} \\ \frac{\partial P}{\partial V} < 0, V > V_{mpp} \end{cases} \quad (2.5)$$

Включення інтегрального регулятора ефективно підвищує продуктивність методу інкрементальної провідності, що також зменшить похибку e , як показано в (2.6).

$$e = \frac{\partial I}{\partial V} + \frac{1}{V} \quad (2.6)$$

У цій роботі реалізація алгоритму інкрементальної провідності та інтегрального регулятора була реалізована в Simulink і показана на рисунку 2.6, де вихід контролера регулюється початковим робочим циклом. Робота моделі базується на матеріалах, наведених у статті [23].

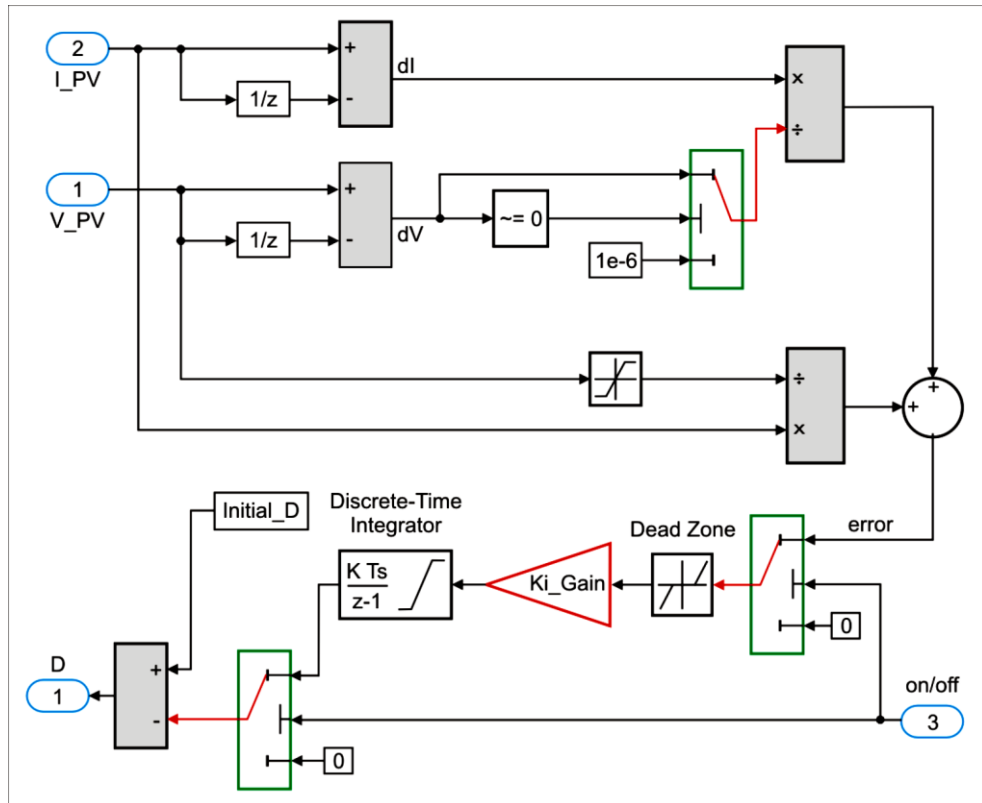


Рисунок 2.6 – Програмна реалізація методу інкрементальної провідності та інтегрального регулятора

2.3.4 Інвертор

У цій симуляції використовувався інвертор на основі IGBT (біполярний транзистор з ізольованим затвором), який перетворює постійний струм (від масиву та перетворювача постійного струму) у змінний.

Ефективність інвертора (наприклад, менші гармонійні спотворення) визначає його здатність перетворювати постійний струм в змінний з точним профілем синусоїди. Ці інвертори використовують високоефективну багаторівневу техніку ШІМ для перетворення постійного струму в змінний.

У цій роботі універсальний міст MATLAB Simulink використовувався як 3-рівневий IGBT, як показано на рисунку 2.7.

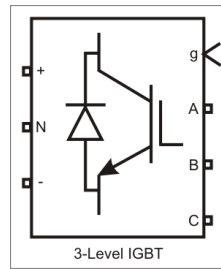


Рисунок 2.7 – Трирівневий блок IGBT в Simulink

Універсальний міст, доступний в MATLAB Simulink, може використовуватися для різних цілей, і в рамках цієї роботи він використовувався як IGBT і функціонував як 3-рівневий, 3-фазний інвертор постійного струму в змінний за типом VSC.

2.3.5 Контролер інвертора

Оскільки фотоелектрична система також підключена до мережі, яка працює з певною напругою і частотою, контролер інвертора спроектований таким чином, як показано на рисунку 2.8, він синхронізує вихід фотоелектричної системи з мережею. Напруга і струм вимірюються в координатах abc на стороні відправлення трансформатора і проходять через фазовий синхронізатор (PLL). PLL генерує фазовий кут, і трифазні параметри перетворюються на двофазні параметри. Це перетворення з системи координат abc в систему координат dq називається синхронною системою координат. Ці параметри проходять через регулятор струму, який призначений для досягнення максимального введення потужності в мережу.

У моделюванні 3-рівневий 3-фазний VSC перетворює 500 В постійного струму в 23В змінного струму. Щоб мінімізувати гармоніки, що генеруються цим VSC, використовується фільтрування конденсаторною батареєю 10 кВАр.

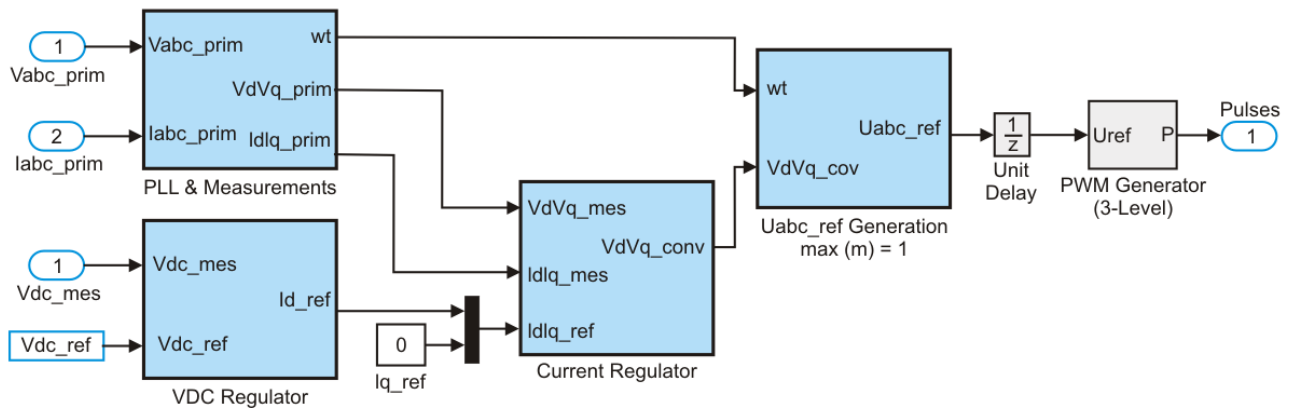


Рисунок 2.8 – Контролер інвертора

2.3.6 Трансформатор

Трансформатор використовується для підвищення напруги від інвертора IGBT. Вихідна напруга трансформатора стає рівною напрузі мережі. У цій симуляції використовувався трифазний трансформатор 230 В/10 кВ (напруга мережі живлення залізничного транспорту). Потім вся система підключалася до навантаження та мережі електропостачання.

2.3.7 Система акумулювання електроенергії (САЕЕ)

Для пом'якшення наслідків переривчастої генерації відновлюваної енергії (наприклад, фотоелектричної сонячної системи) було розглянуто використання системи акумулювання енергії в акумуляторах (САЕЕ) з метою підвищення надійності системи та забезпечення гнучкості її експлуатації.

САЕЕ, як показано на рисунку 2.9, має три компоненти:

- Акумуляторна батарея (що складається з літій-іонних акумуляторів).
- Двонаправлений перетворювач постійного струму. Це перетворювач типу Сик з двома перемикачами для контролю потоку енергії.
- Інвертор постійного струму в змінний. Він перетворює постійну напругу в змінну і підтримує рівень напруги.

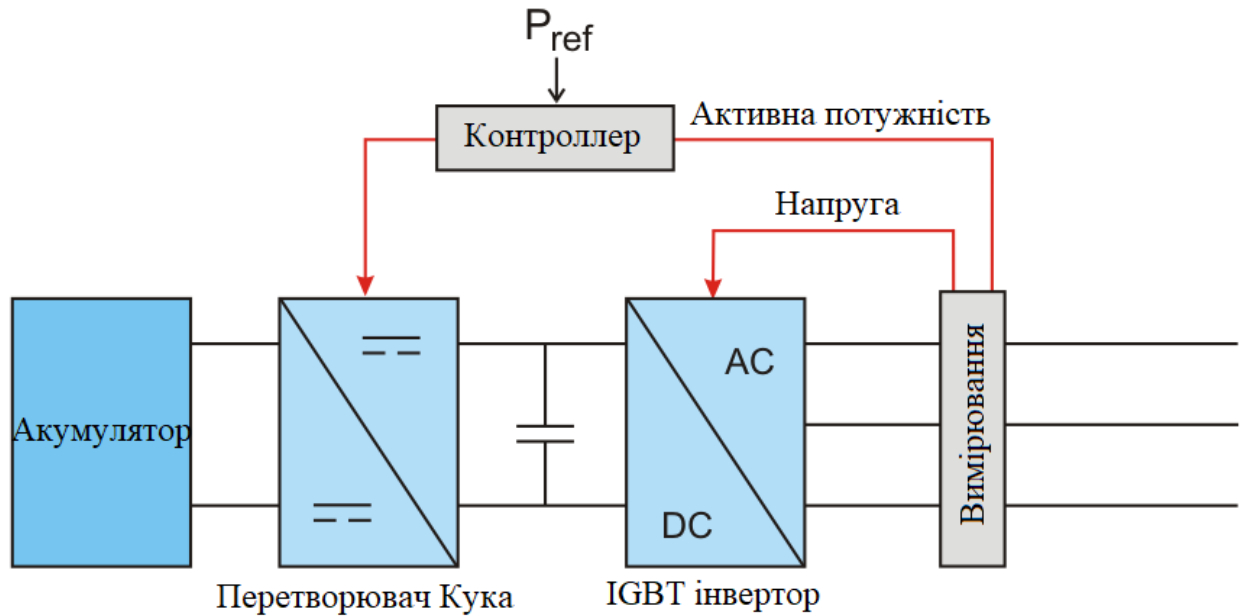


Рисунок 2.9 – Блок-схема САЕЕ

Основна мета САЕЕ – постачати енергію до навантаження, коли фотоелектрична система не в змозі забезпечити загальну потужність, необхідну для навантаження. САЕЕ доповнює загальну потужність, що генерується фотоелектричною системою. Основне призначення акумулятора — постачання додаткової енергії до навантаження. Це підвищує ефективність всієї установки. САЕЕ дозволяє контролювати потік активної потужності в акумулятор.

Для моделювання всі три компоненти були реалізовані в MATLAB Simulink, щоб оцінити вплив САЕЕ на постачання енергії до навантаження, а також його вплив на електромережу.

2.3.8 Акумуляторна батарея

MATLAB Simulink надає можливість моделювання складної динаміки акумулятора, що є дуже корисним для цієї роботи. Однак він не враховує старіння акумулятора та залежність від температури. Навіть без урахування старіння акумулятора та залежності від температури, моделювання акумулятора, що надається MATLAB Simulink, вважається дуже точним для цієї роботи. Модель акумулятора показана на рисунку 2.10.

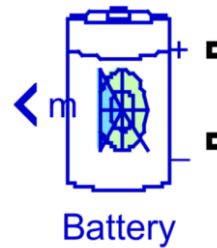


Рисунок 2.10 – Модель акумулятора в Simulink

Параметри моделі акумулятора, яка використовується в цій роботі, показані в таблиці 2.2.

Таблиця 2.2 – Параметри акумулятора

Тип	Літій-іонний
Номінальна напруга (В)	500
Номінальна ємність (А·год)	200
Початковий стан заряду (SOC)	80
Максимальна ємність (А·год)	200
Напруга відключення (В)	375
Напруга при повній зарядці (В)	581
Номінальний струм розряду (А)	86,9
Внутрішній опір (Ом)	0,025
Ємність (А·год) при номінальній напрузі	180

2.3.9 Перетворювач постійного струму (перетворювач Кука)

У роботі розглядається наступний перетворювач постійного струму, який показано на рис.2.11. Це двонаправлений перетворювач Кука. У цій симуляції параметри цього перетворювача мають наступні значення:

$$C1 = 500\mu\text{F}$$

$$C2 = 2000\text{gF}$$

$$C3 = 8000\mu\text{F}$$

$$L1 = 12\mu\text{H}$$

$$L4 = 12\mu\text{H}$$

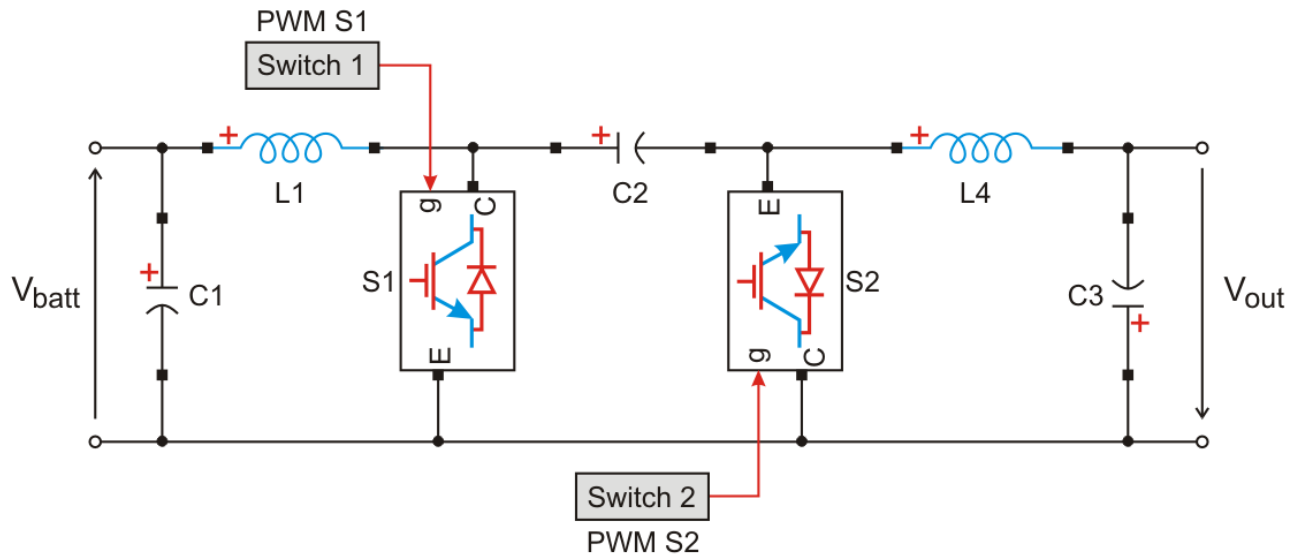


Рисунок 2.11 – Перетворювач постійного струму, що використовується в CAEE

Цей перетворювач постійного струму контролює активний потік енергії батарей. Він заряджає батарею, контролюючи напругу на клеммах. Це можливо завдяки регулюванню робочого циклу. Енергія, що споживається з панелі та подається в батарею, контролюється перемикачами S1 і S2 відповідно. Ці перемикачі працюють по черзі. Напруга на клеммах акумулятора також контролюється цими перемикачами. Конденсатор C3 зменшує стрибок напруги на вихідній клемі перетворювача.

Моделювання передбачає високе значення для C2 і C3, щоб забезпечити велику ємність. Наприклад, конденсатор C3 зменшує пульсацію вихідної напруги. Це важливо, оскільки пульсація повинна бути якомога меншою. Конденсатор C2 підтримує постійну напругу між перемикачами під час передачі енергії від акумуляторної батареї до VSC.

Робота перетворювача Кука поділяється на три основні етапи. Спочатку розраховується різниця активної потужності в точці PCC. Вплив CAEE пропорційний різниці активної потужності. Вплив CAEE вважається нульовим, якщо різниця активного потоку потужності нижча за порогове значення, щоб запобігти безперервному заряджанню та розряджанню акумулятора. На наступному етапі розраховується цільова вихідна напруга.

Початковий стан CAEE залишається постійним під час моделювання. На

останньому етапі розраховується робочий цикл перетворювача Кука, який перетворюється на сигнал PWM.

2.3.10 Інвертор постійного струму в змінний (VSC)

Для CAEE використовується той самий інвертор (з подібним описом), що і для фотоелектричних систем. Однак під час моделювання було виявлено, що управління є надзвичайно складним, і рекомендується провести додаткове дослідження. Вимірювання напруги проводиться в мережі і проходить через фазовий контур, щоб генерувати синхронізований фазовий кут. Інвертор також мінімізує втрати вхідної потужності. Для цього він використовує зворотний зв'язок і регулює напругу кола постійного струму. Інвертор також використовує регулювання струму, що дозволяє досягти максимального введення потужності в мережу.

2.4 Висновки до розділу

У цьому розділі кваліфікаційної роботи викладено методику моделювання комбінованої фотоелектричної системи з системою акумулювання електроенергії (PV-CAEE) у середовищі MATLAB Simulink. Обґрунтовано вибір програмної платформи, що надає широкі можливості для проектування, тестування та аналізу складних електроенергетичних систем у різних умовах експлуатації.

1. Розроблено структурну схему досліджуваної системи, яка складається з двох взаємопов'язаних підсистем: фотоелектричної генерації та системи акумулювання енергії в літій-іонних акумуляторах. Наведено параметри всіх ключових компонентів, зокрема фотоелектричної панелі потужністю 100 кВт, побудованої з 330 сонячних модулів, підвищувального перетворювача постійного струму, 3-рівневого 3-фазного інвертора на базі IGBT,

трансформатора 230 В/10 кВ, а також конденсаторної батареї 10 кВАр для фільтрації гармонік.

2. Описано алгоритм відстеження точки максимальної потужності (MPPT), реалізований на основі методу інкрементальної провідності з інтегральним регулятором, який забезпечує оптимізацію робочого циклу підвищувального перетворювача та максимальний збір енергії з фотоелектричного масиву за змінних умов інсоляції. Розглянуто принципи синхронізації інвертора з електромережею за допомогою фазового синхронізатора (PLL) та перетворення координат $abc-dq$, що дозволяє незалежно регулювати активну та реактивну складові струму.

3. Детально описано систему акумулювання енергії (CAEE), що включає літій-іонну акумуляторну батарею (номінальна напруга 500 В, ємність 200 А·год), двонаправлений перетворювач Кука постійного струму типу з контролером керування потоком активної потужності та інвертор постійного струму в змінний. Визначено, що основне призначення CAEE — компенсація дефіциту потужності фотоелектричної системи та підтримка стабільного енергопостачання навантаження.

4. Усі компоненти системи реалізовано у вигляді функціональної моделі в MATLAB Simulink, що створює основу для проведення комп'ютерного моделювання, аналізу перехідних процесів та оцінки ефективності запропонованої конфігурації PV-CAEE, яка буде розглянута в наступному розділі роботи.

3 РОЗРАХУНКОВИЙ РОЗДІЛ

3.1 З'єднання фотоелектричних панелей в поле та їх характеристики

Для початку представлені результати моделювання для кожного фотоелектричного модуля та для всього фотоелектричного масиву відповідно. Фотоелектрична матриця показана на рисунку 3.1; загалом 330 сонячних модулів забезпечують 100,7 кВт за стандартних умов випробування (STC). Компонування фотоелектричної матриці складається з 66 паралельних стрінгів, де кожен стрінг має 5 послідовно з'єднаних панелей SunPower (зі специфікацією SPR-305E-WHT-D згідно з таблицею 3.1). Фотоелектрична панель має оптимальну потужність $66 \cdot 5 \cdot 305,2 \text{ Вт} = 100,7 \text{ кВт}$ при $25 \text{ }^\circ\text{C}$ або STC, згідно з таблицею 3.2.

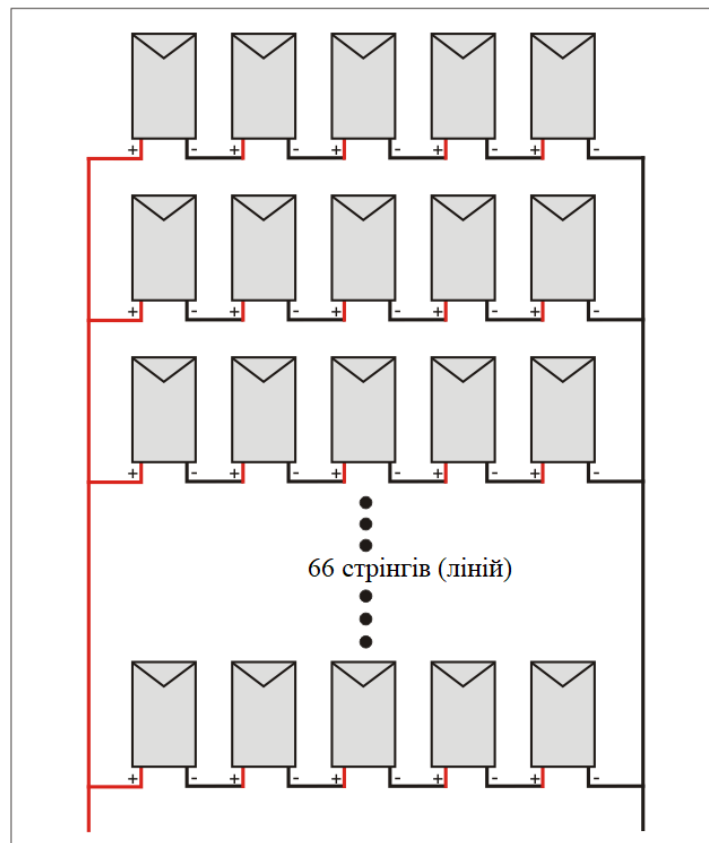


Рисунок 3.1 – Фотоелектричні панелі, з'єднані послідовно і паралельно для формування масиву

Таблиця 3.1 – Технічні дані фотоелектричного модуля (SPR-305E-WHT-D) при STC

Струм короткого замикання I_{sc}	5,96 А
Струм у точці максимальної потужності I_{mpp}	5,58 А
Напруга у точці максимальної потужності V_{mpp}	54,7 В
Напруга розімкнутого кола V_{oc}	64,2 В
Кількість комірок у серії n_s	96

Таблиця 3.2 – Технічні дані фотоелектричної панелі (потужність 100 кВт при STC)

Кількість модулів у послідовному з'єднанні N_{ss}	5
Кількість модулів у паралельному з'єднанні N_{pp}	66
Номінальна вихідна напруга	273,5 В
Номінальний вихідний струм	368,3 А
Максимальна вихідна потужність	100,7 кВт

Характеристики напруги та струму фотоелектричної панелі при зміні інтенсивності сонячного випромінювання показані на рисунку 3.2. Вихідний струм фотоелектричної панелі лінійно пов'язаний з інтенсивністю сонячного випромінювання. Інтенсивність сонячного випромінювання також впливає на напругу фотоелектричного модуля, але не настільки істотно. Через зміну інтенсивності сонячного випромінювання загальна потужність фотоелектричного модуля також змінюється, як показано на рисунку 3.2. Зменшення інтенсивності сонячного випромінювання знижує загальну продуктивність фотоелектричної панелі. Аналогічно, вплив температури проаналізовано на рисунку 3.3а та рисунку 3.4. Температура впливає на напругу фотоелектричної панелі. Підвищення температури знижує продуктивність фотоелектричної панелі.

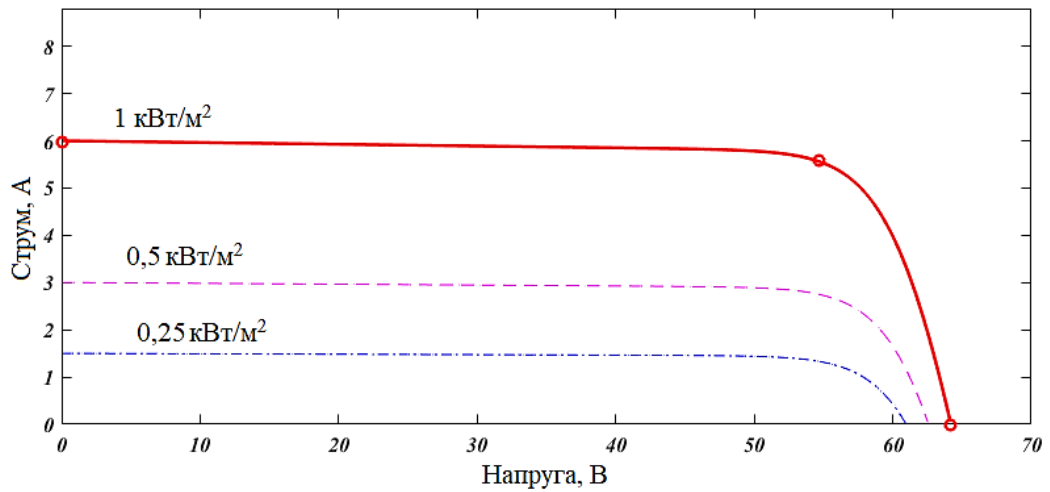


Рисунок 3.2 – I-V характеристики фотоелектричної панелі при зміні інтенсивності сонячного випромінювання

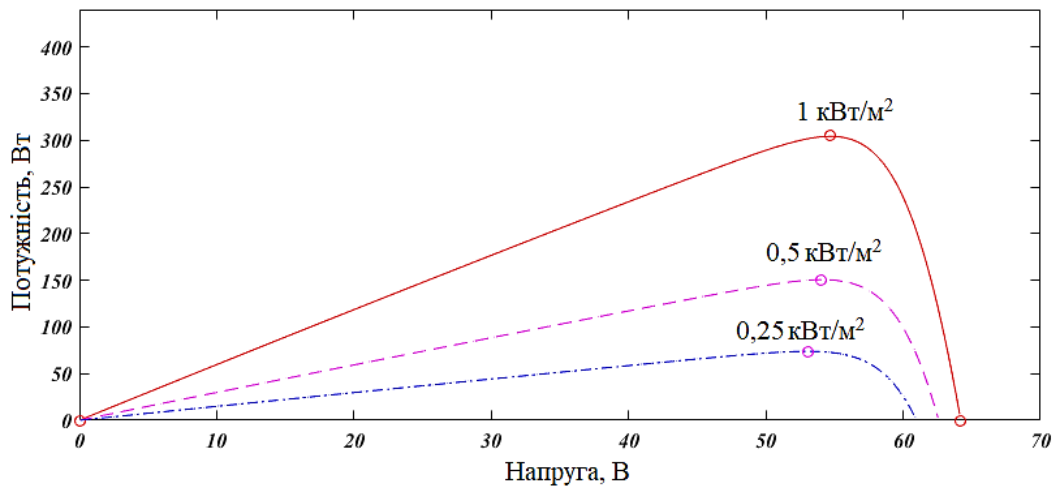


Рисунок 3.3 – P-V Характеристики фотоелектричної панелі при зміні інтенсивності сонячного випромінювання

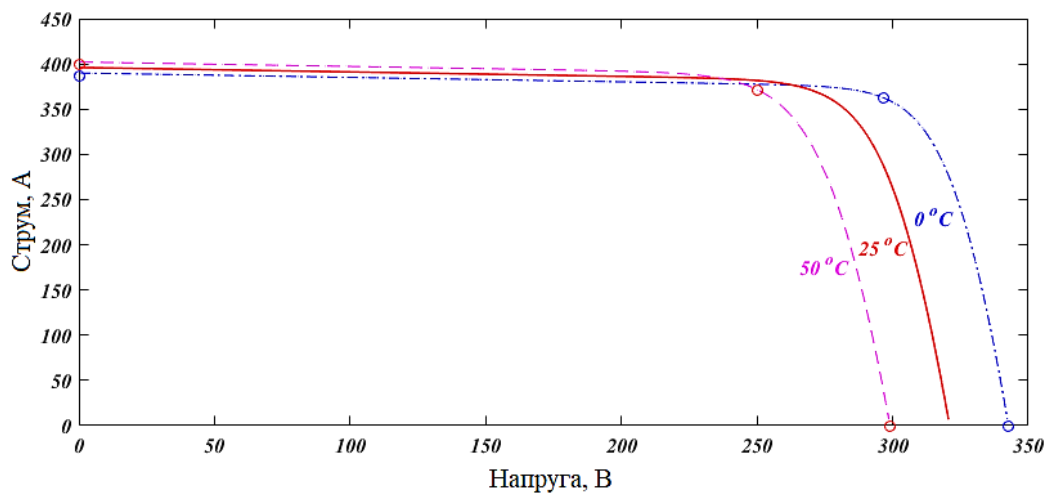


Рисунок 3.4 – I-V Характеристики фотоелектричної панелі при зміні температури

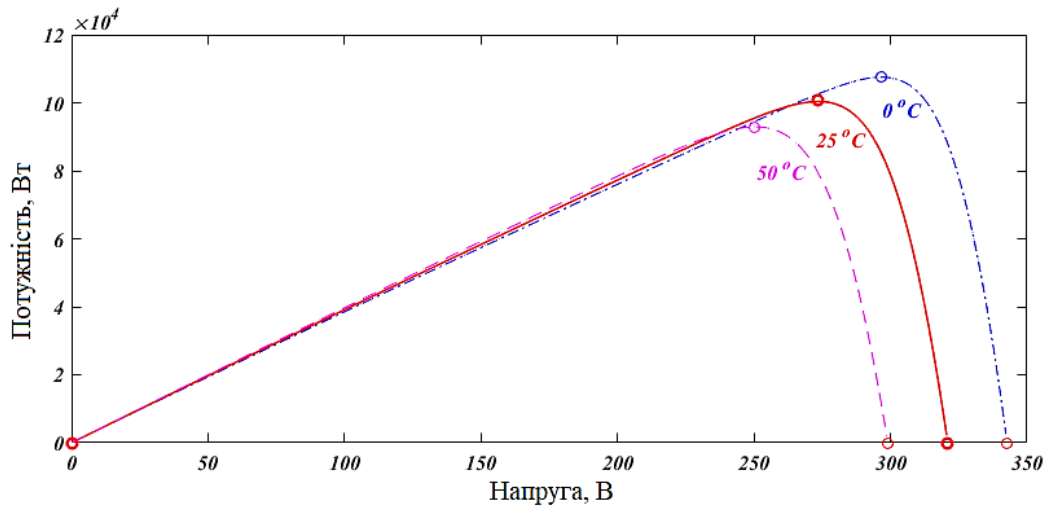


Рисунок 3.5 – Характеристики P-V фотоелектричної панелі при зміні температури

Надалі представлено результати моделювання чотирьох варіантів. показано нижче.

3.2 Моделювання продуктивності фотоелектричної системи

У цьому випадку аналізується продуктивність фотоелектричної системи. Фотоелектрична система складається з фотоелектричної панелі, підсилюючого перетворювача постійного струму, інвертора постійного/змінного струму типу VSC, фільтра, трансформатора і підключена до навантаження та мережі, як описано в розділі 2. Він складається з двох частин – у частині (а) в цьому випадку інтенсивність сонячного випромінювання та температура вважаються постійними, фотоелектрична батарея генерує електроенергію та подає її на електричне навантаження. Моделювання починається з припущення про стандартні умови сонячного випромінювання (1000 Вт/м^2 та $25 \text{ }^\circ\text{C}$), коли від фотоелектричної панелі можна отримати максимальну вихідну потужність (100,7 кВт). У частині (б) інтенсивність сонячного випромінювання змінюється від 1000 Вт/м^2 до 250 Вт/м^2 . Вихідна потужність фотоелектричної панелі падає до 24,3 кВт. Моделювання також враховувало зміну температури від $25 \text{ }^\circ\text{C}$ до $50 \text{ }^\circ\text{C}$, що впливає на вихідну потужність фотоелектричної панелі від 100,7 кВт

до 93 кВт.

На рисунку 3.6 показано енергетичний потік: починаючи з генерації електроенергії фотоелектричною батареєю і закінчуючи подачею енергії на електричне навантаження. Електроенергія, що генерується фотоелектричною батареєю, надходить на навантаження через інвертор постійного-змінного струму, як показано на рисунку 3.6.

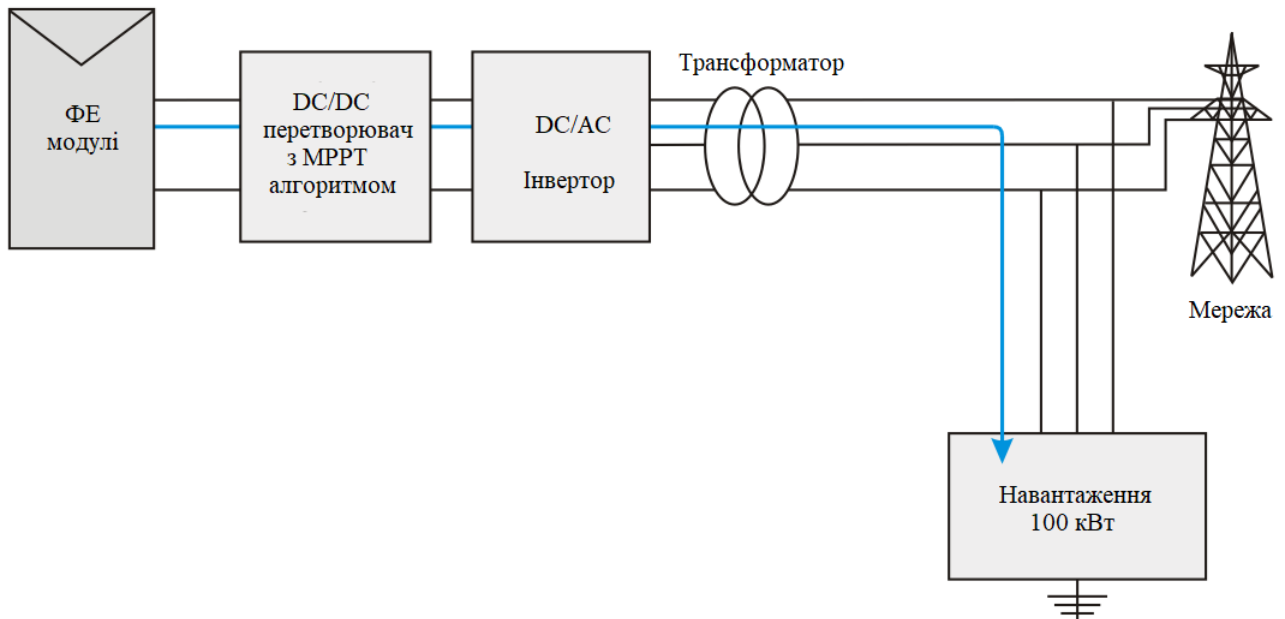


Рисунок 3.6 – Енергетичний потік фотоелектричної системи.

Результати моделювання отримано наступним чином:

1. Стаціонарна продуктивність фотоелектричної системи.
2. Продуктивність фотоелектричної системи за різних умов експлуатації.
3. Результати моделювання фотоелектричної системи з акумуляторною батареєю

3.2.1 Стаціонарна продуктивність фотоелектричної панелі

Стаціонарна продуктивність фотоелектричної системи, частина (а), наведена на рисунку 3.7 до рисунку 3.12. Для цього результату моделювання інтенсивність сонячного випромінювання та температура вважаються постійними протягом усього часу моделювання.

Від $t = 0$ с до $t = 0,05$ с імпульсний підсилюючий перетворювач і VSC

заблоковані. Напряга фотоелектричної системи відповідно до напруги розімкнутого кола досягає 321 В, як показано на рисунку 3.9. При $t = 0,05$ с імпульсний підсилюючий перетворювач і VSC розблоковані. Напряга в колі постійного струму регулюється на рівні 500 В, а робочий цикл підвищувального перетворювача фіксується на рівні 0,5, як показано на рисунку 3.10. Стаціонарна робота фотоелектричної системи досягається в момент $t = 0,25$ с, коли потужність і напруга фотоелектричної панелі досягають 96 кВт і 250 В, як показано на рисунку 3.8 і рисунку 3.9. Однак максимальна потужність фотоелектричних панелей становить 100,7 кВт при 1000 Вт/м^2 . Алгоритм MPPT був увімкнений при $t = 0,5$ для отримання максимальної вихідної потужності фотоелектричної панелі, він починає регулювати напругу фотоелектричної панелі, змінюючи робочий цикл підсилювача напруги для отримання максимальної потужності. Максимальна потужність (100,7 кВт) і напруга (274 В) досягаються при $D = 0,545$. Напряга і струм знаходяться в фазі на шині 10 кВ, як показано на рисунку 3.12.

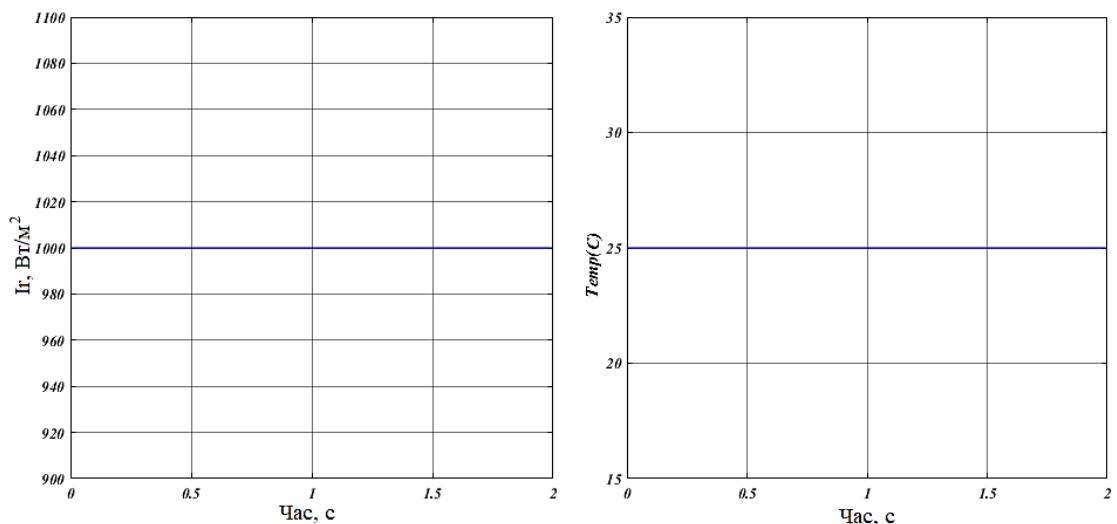


Рисунок 3.7 – Постійна інтенсивність сонячного випромінювання і температура, використані для варіанту 1, частина (а).

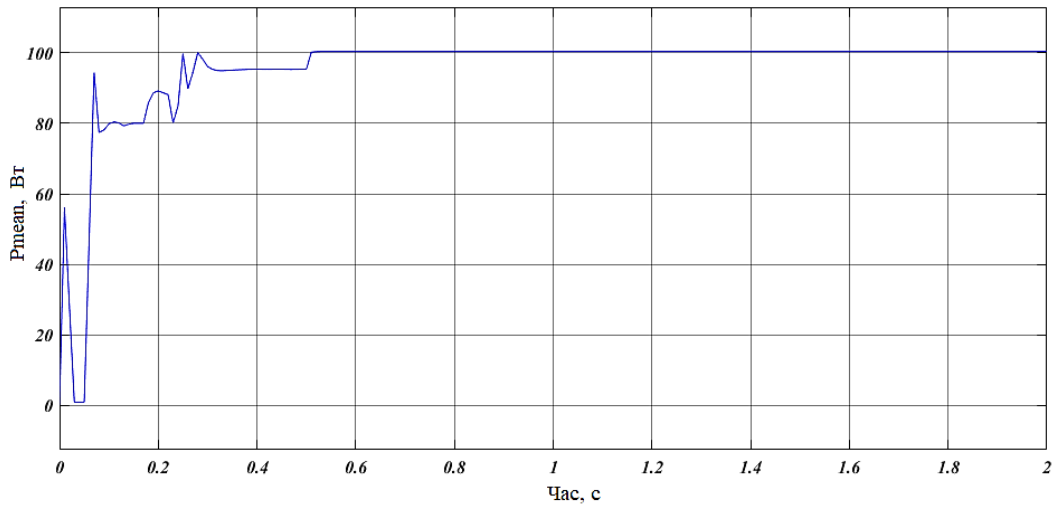


Рисунок 3.8 – Вихідна потужність постійного струму від фотоелектричної панелі

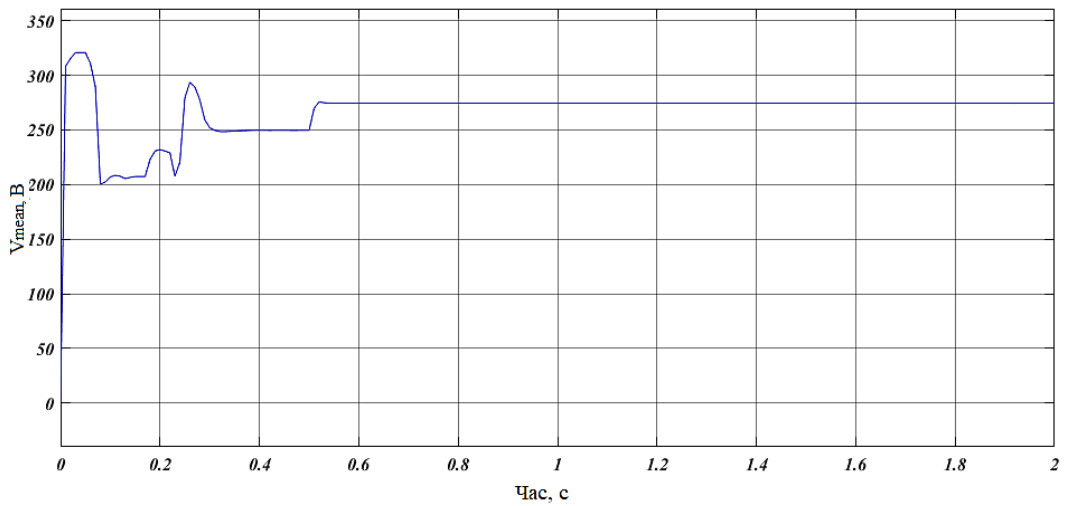


Рисунок 3.9 – Вихідна напруга постійного струму від фотоелектричної системи

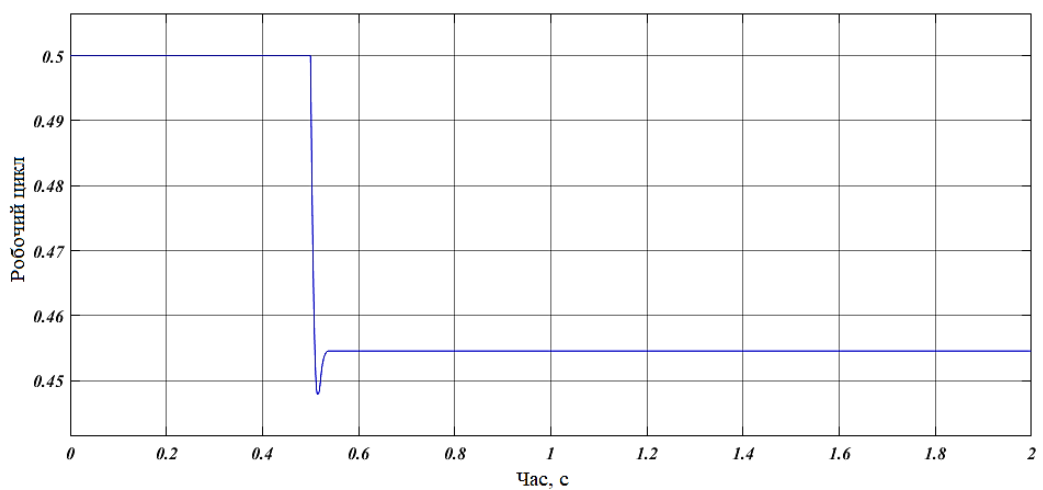


Рисунок 3.10 – Робочий цикл підвищувального перетворювача

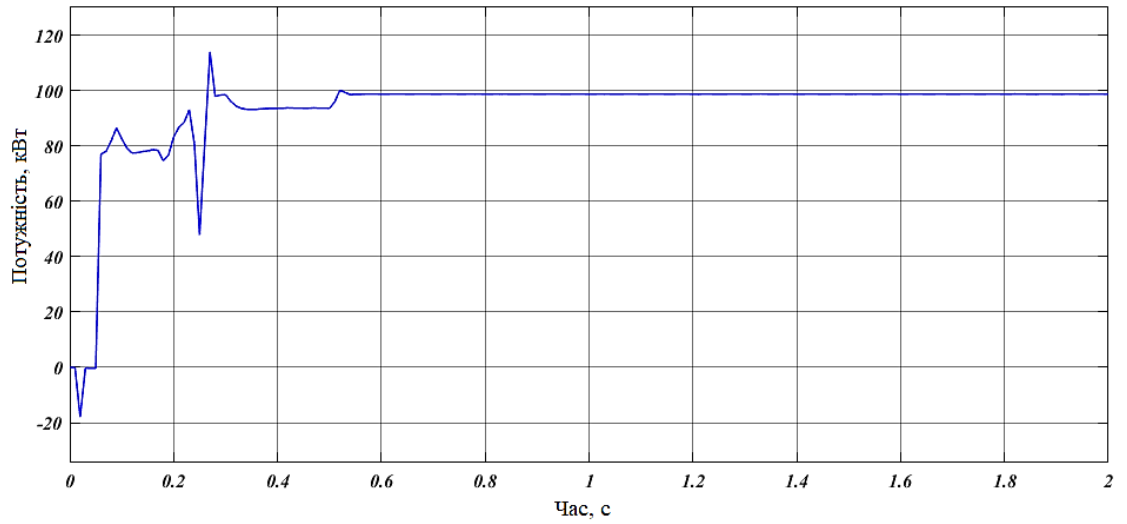


Рисунок 3.11 – Вихідна потужність фотоелектричної системи, що подається на навантаження.

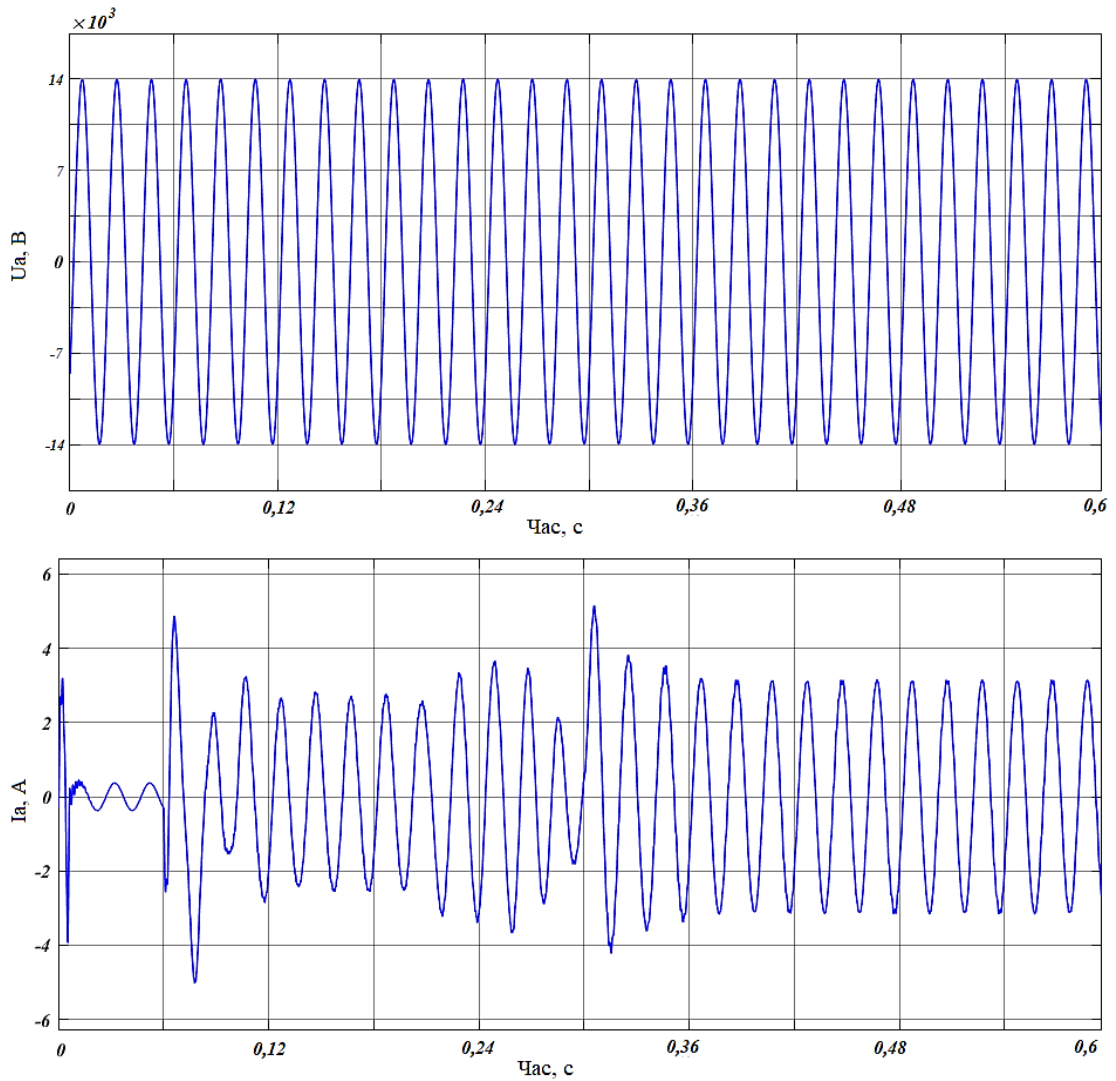


Рисунок 3.12 – Форма хвилі напруги та струму однієї фази на шині 10 кВ змінного струму

3.2.2 Продуктивність фотоелектричної панелі за різних умов експлуатації

У цьому випадку інтенсивність сонячного випромінювання та температура змінюються, щоб побачити поведінку фотоелектричної системи. У випадку від початку моделювання до $t = 0,6$ с інтенсивність сонячного випромінювання становить 1000 Вт/м^2 . Від $t = 0,6$ до $t = 1,1$ с інтенсивність сонячного випромінювання знижується з 1000 Вт/м^2 до 250 Вт/м^2 , а від $t = 1,2$ с до $t = 1,6$ с сонячна інтенсивність зростає з 250 Вт/м^2 до 1000 Вт/м^2 , а температура фотоелектричної панелі підвищується з $25 \text{ }^\circ\text{C}$ до $50 \text{ }^\circ\text{C}$, щоб спостерігати вплив температури, як показано на рисунку 3.13.

Вихідна потужність фотоелектричної панелі має таку саму поведінку, як і в першому випадку, до $t = 0,6$ с, з тією лише різницею, що алгоритм МРРТ активується негайно, коли вихідна потужність досягає стаціонарного стану при $t = 0,25$ с, щоб отримати максимальну потужність. Оскільки інтенсивність сонячного випромінювання знизилася з 1000 Вт/м^2 до 250 Вт/м^2 протягом $t = 0,6$ с до $t = 1,1$ с і відновилася з 250 Вт/м^2 до 1000 Вт/м^2 протягом $t = 1,2$ с до $t = 1,7$ с, МРРТ продовжує відстежувати максимальну потужність. При $t = 1,2$ с робочий цикл становить $0,461$, коли інтенсивність випромінювання зменшується до 250 Вт/м^2 , середня вихідна потужність і напруга становлять 268 В і $24,3 \text{ кВт}$. Було проаналізовано вплив температури при її підвищенні до $50 \text{ }^\circ\text{C}$ при $t = 2$ с, вихідна потужність зменшується з $100,7 \text{ кВт}$ до 93 кВт . Характеристики вихідної потужності, описані вище, показані на рисунку 3.14 та рисунку 3.18.

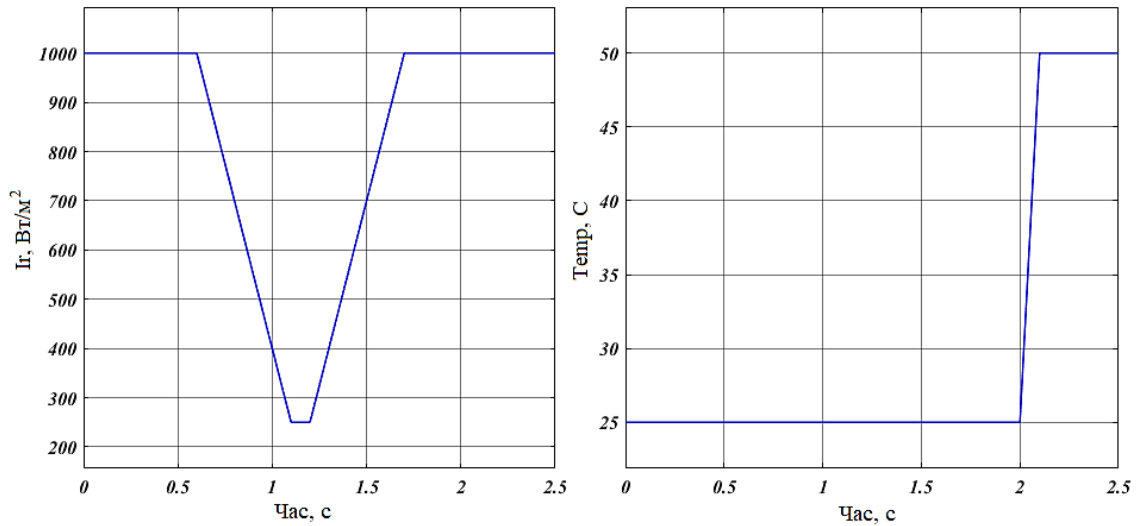


Рисунок 3.13 – Розподіл інтенсивності сонячного випромінювання та температури на фотоелектричній панелі

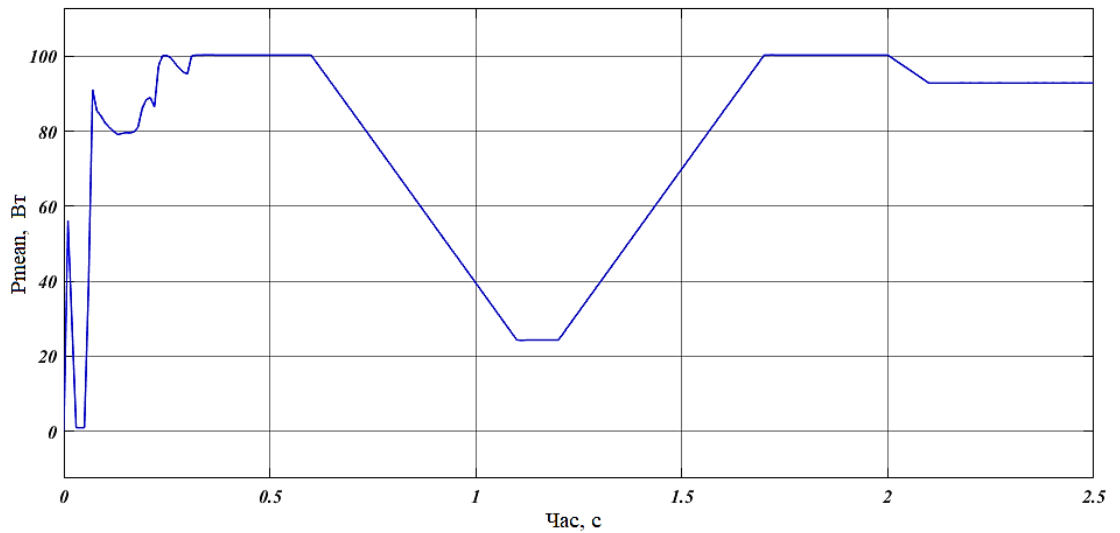


Рисунок 3.14 – Середня потужність фотоелектричної панелі

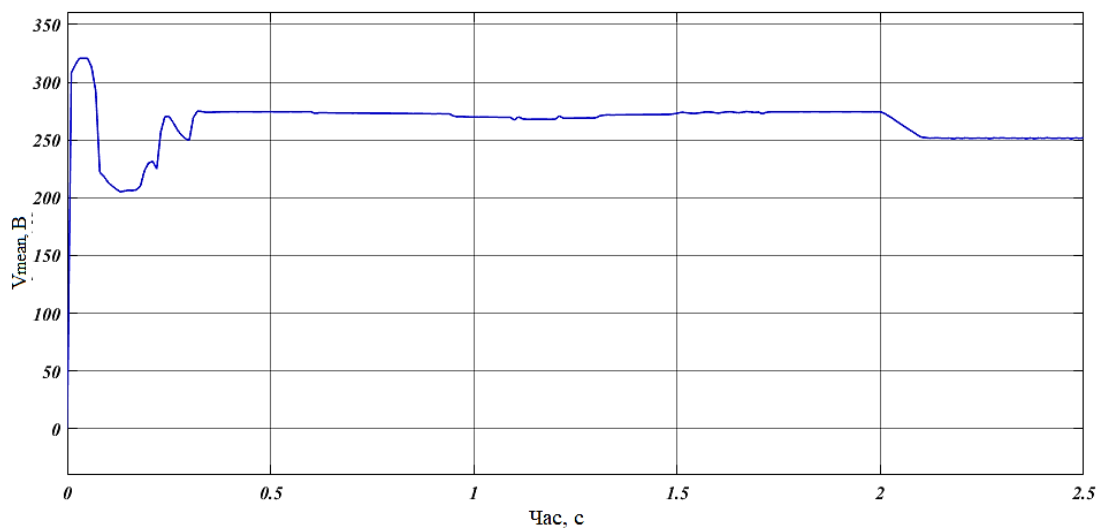


Рисунок 3.15 – Середня напруга фотоелектричної системи

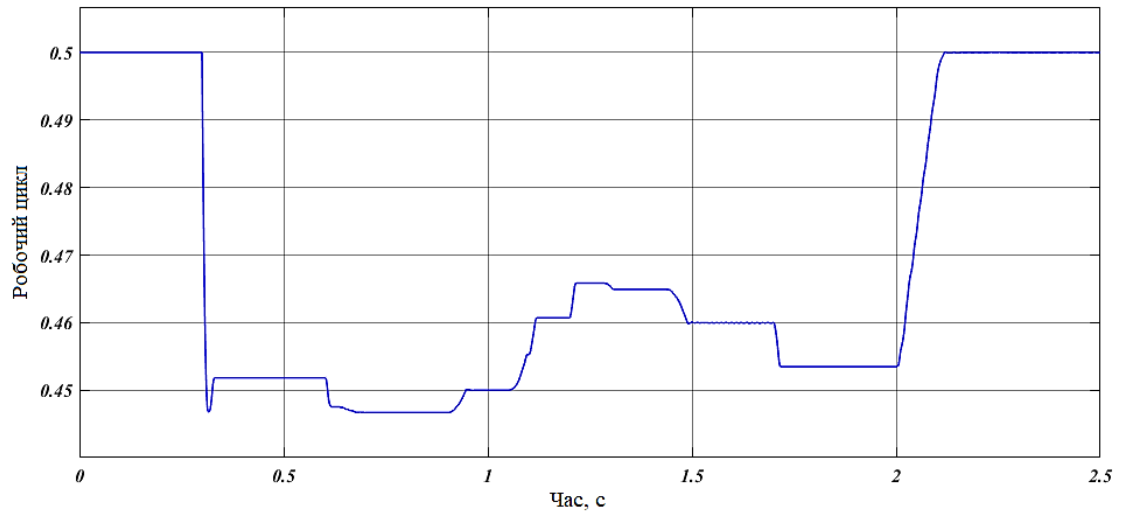


Рисунок 3.16 – Зміна робочого циклу

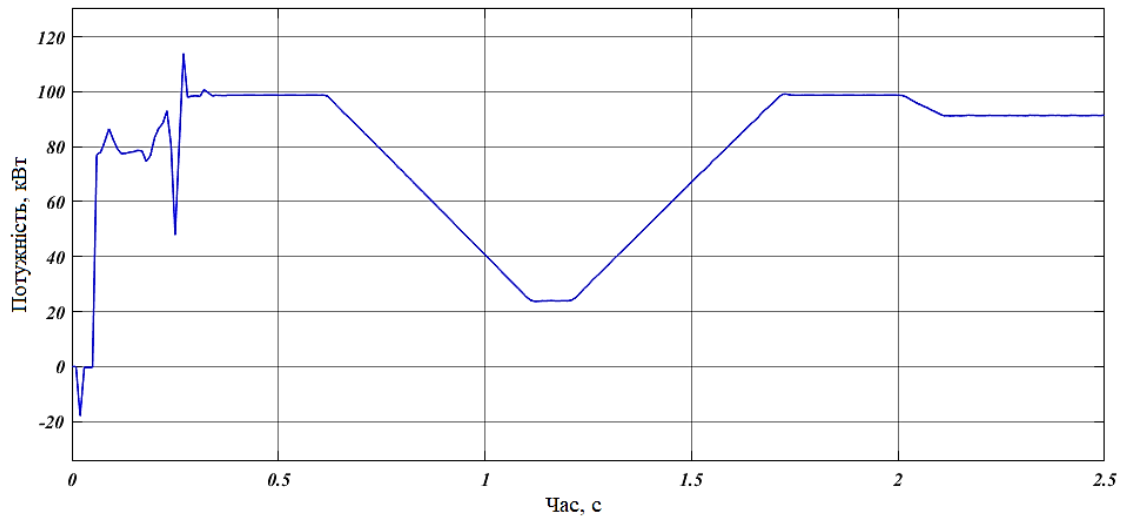


Рисунок 3.17 – Вихідна потужність фотоелектричної системи

3.2.3 Результати моделювання для PV-САЕЕ

У моделюванні було розглянуто ще три сценарії для отримання більш глибокого розуміння системи PV-САЕЕ.

- Коли фотоелектрична система генерує постійну необхідну для споживача потужність.
- Коли фотоелектрична система генерує менше потужності, ніж потрібно, САЕЕ розряджається.
- Коли фотоелектрична система генерує більше потужності, ніж

потрібно, САЕЕ заряджається.

Ці три сценарії представляють роботу PV-САЕЕ відповідно до блок-схеми на рисунку 3.19, яка була включена в моделювання.

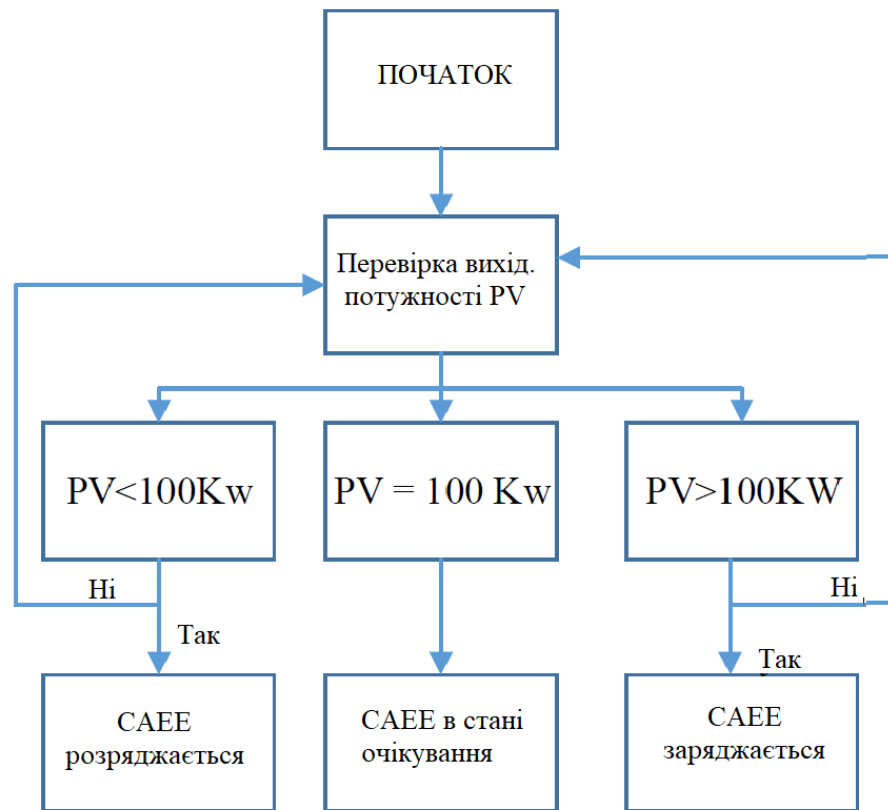


Рисунок 3.19 – Блок-схема роботи PV-САЕЕ

У першому випадку система PV і система САЕЕ підключені паралельно до електромережі та навантаження. Масив PV генерує електроенергію з оптимальною потужністю 100 кВт. У цьому сценарії роль акумулятора майже незначна. Акумулятор реагує тільки під час стабілізації системи PV. Схема потоку енергії показана на рисунку 3.20, а вихідна потужність від PV, САЕЕ, PV-САЕЕ (або потужність, що подається на навантаження) і мережі показана на рисунку 3.21.

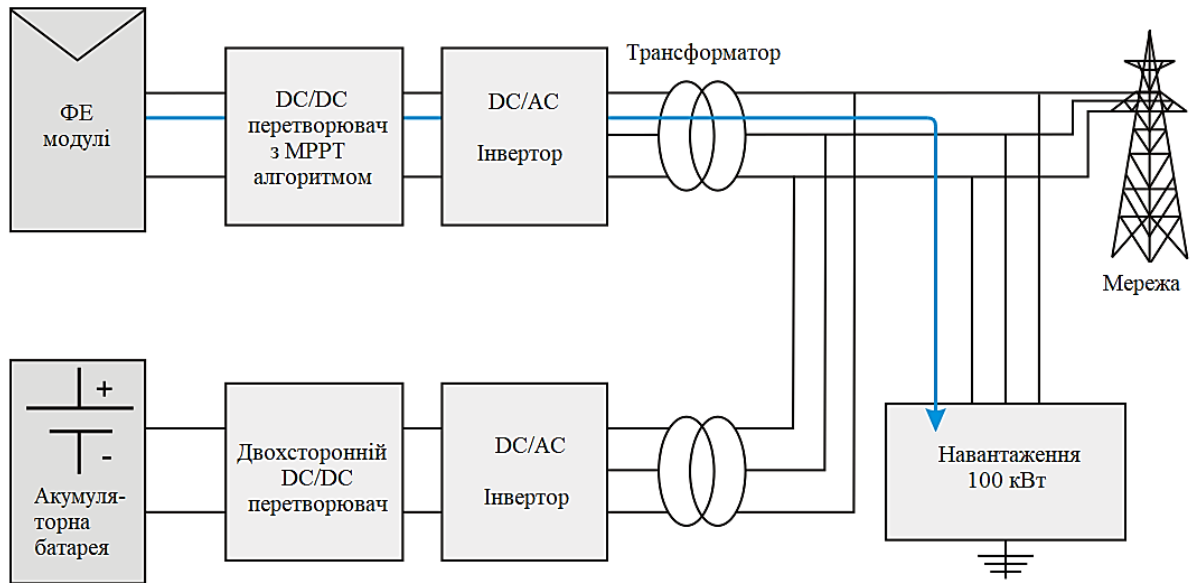


Рисунок 3.20 – Потік енергії для системи PV-CAEE

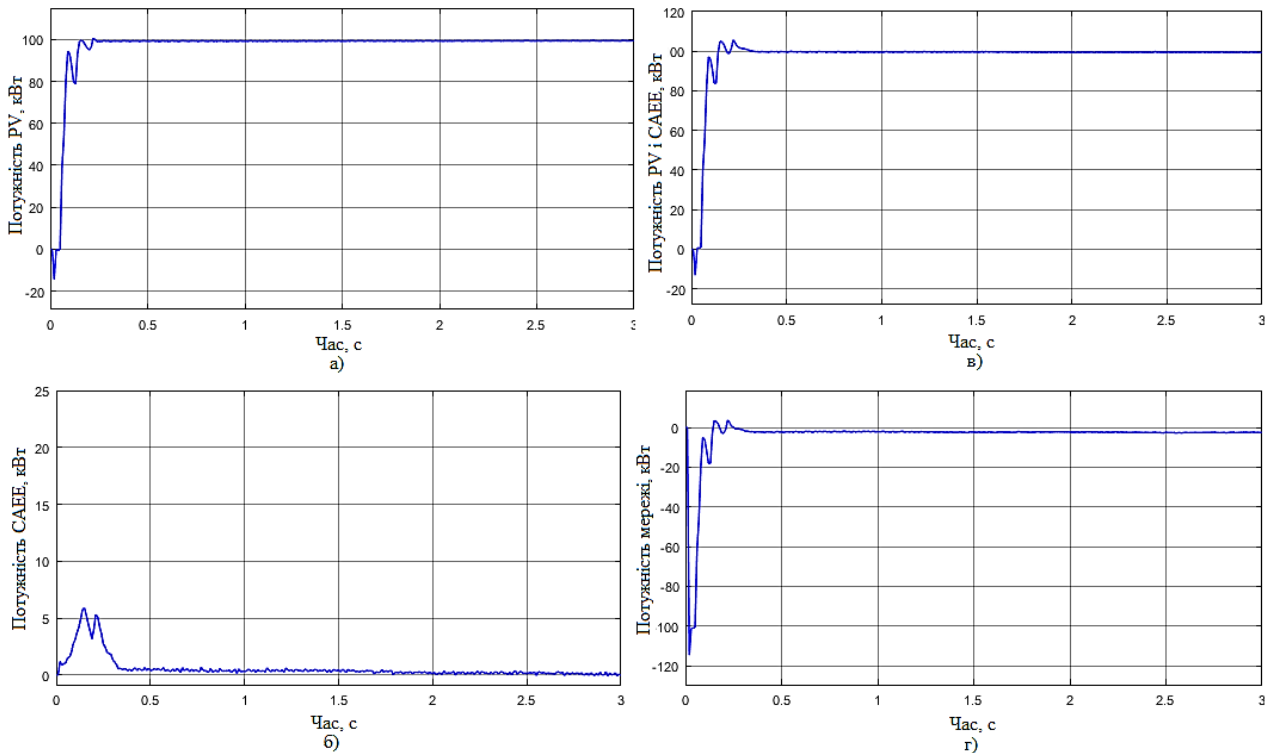


Рисунок 3.21 – Потужність: (а) PV, (б) CAEE, (в) PV і CAEE, (г) мережі

Для розглянутого варіанту в моделюванні передбачалося, що вихідна потужність PV коливається через зміну інтенсивності сонячного випромінювання протягом певних інтервалів від 1000 Вт/м^2 до 150 Вт/м^2 . Щоб забезпечити необхідну потужність навантаження, CAEE подає потужність на навантаження шляхом розряджання акумулятора; припустимо, що акумулятор був попередньо заряджений. Це забезпечує безперервне живлення

навантаження. Загальна схема потоку потужності показана на рисунку 3.22.

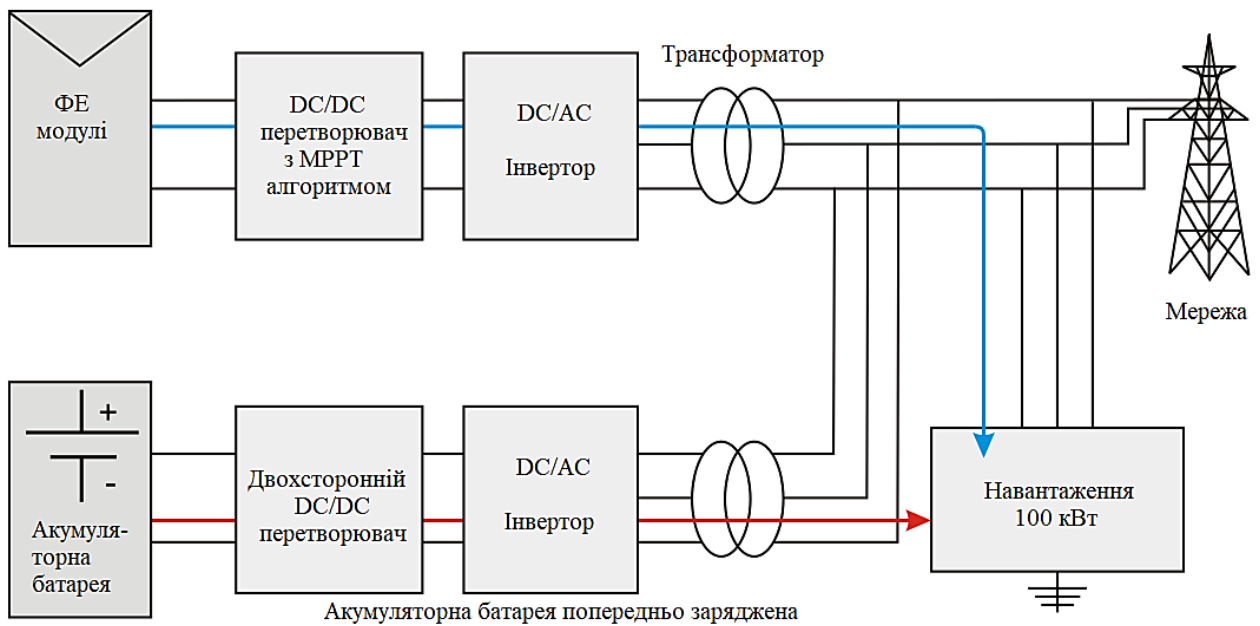


Рисунок 3.22 – Схема потоку енергії для системи PV-САЕЕ

У варіанті 3 розряд батареї компенсує дефіцит електроенергії, що генерується фотоелектричною батареєю. Загальні вимоги до навантаження задовольняються як за рахунок розряду батареї, так і за рахунок фотоелектричної панелі. На рисунку 3.23 (а) показано, що потужність, що генерується фотоелектричною системою при змінній інтенсивності сонячного випромінювання від $t = 0$ с до $t = 8$ с, загальна потужність, що подається, варіюється від 100 кВт до 15 кВт. На рисунку 3.23(б) показано потужність, що споживається з акумулятора для забезпечення постійного живлення навантаження. На рисунку 3.23(в) показано загальну потужність, що подається від фотоелектричної панелі та САЕЕ до навантаження, а на рисунку 3.23(г) показано потужність, що подається від мережі. Рисунок 3.24 показує загальний вплив комбінованої потужності на одному діаграмі. У міру споживання енергії з акумулятора стан заряду також зменшується з 79,32% до 79,23%, як показано на рисунку 3.25. На рисунку 3.26 показано однофазну напругу та форму хвилі струму в точці з'єднання. Хоча вони знаходяться в фазі, вони не є чисто синусоїдальними, що вимагає вдосконалення за допомогою точного контролю контролера САЕЕ.

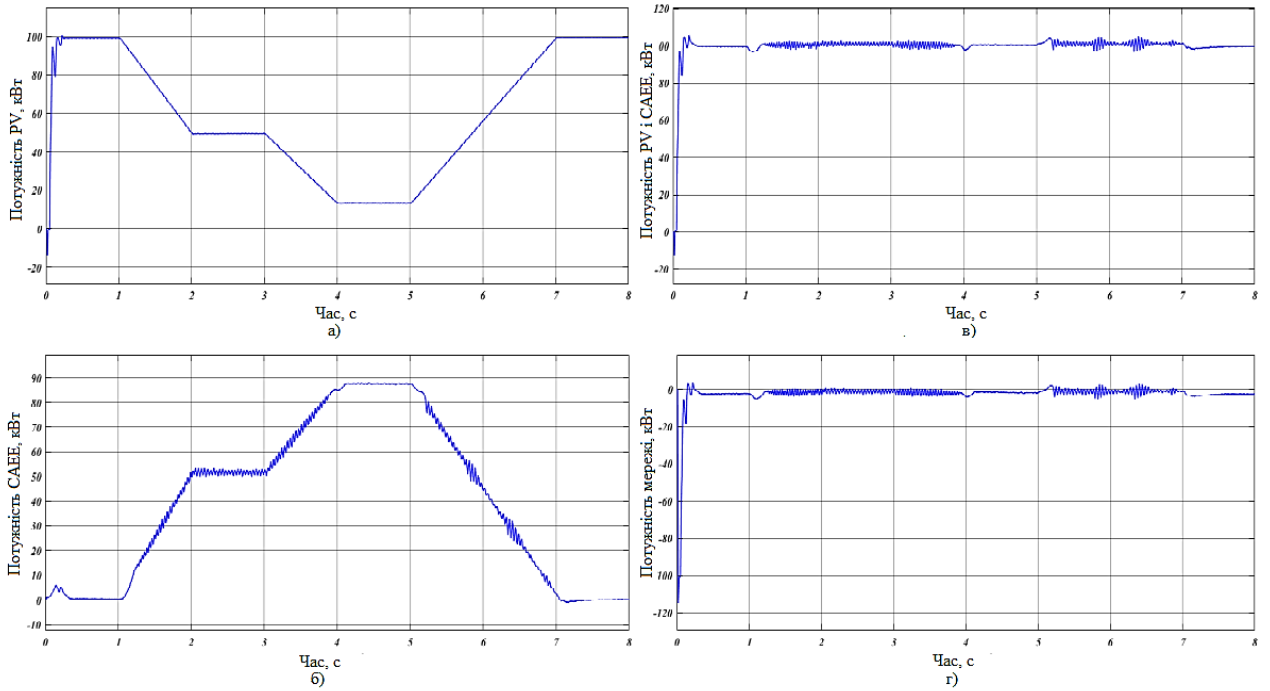


Рисунок 3.23 – Потужність: (а) PV, (б) CAEE, (в) PV і CAEE, (г) мережі

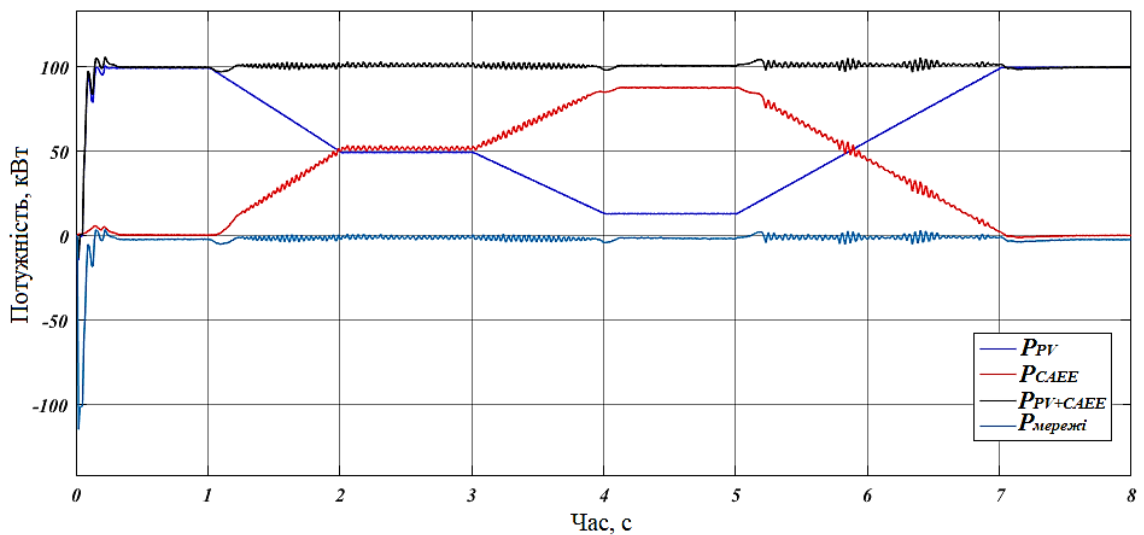


Рисунок 3.24 – Генерування потужності всієї системи на одній діаграмі

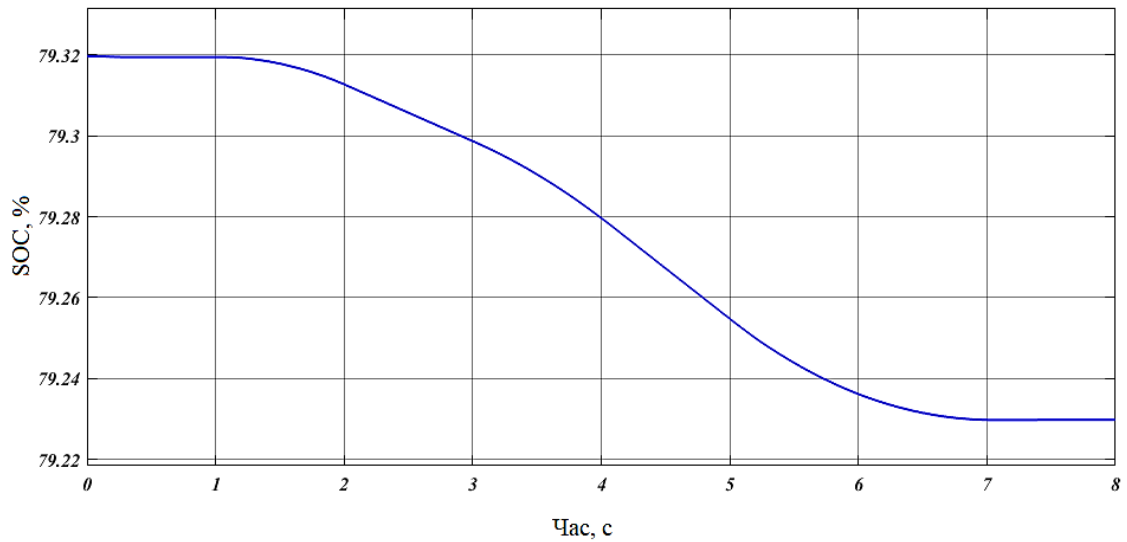


Рисунок 3.25 – Стан заряду (у %) акумуляторної батареї

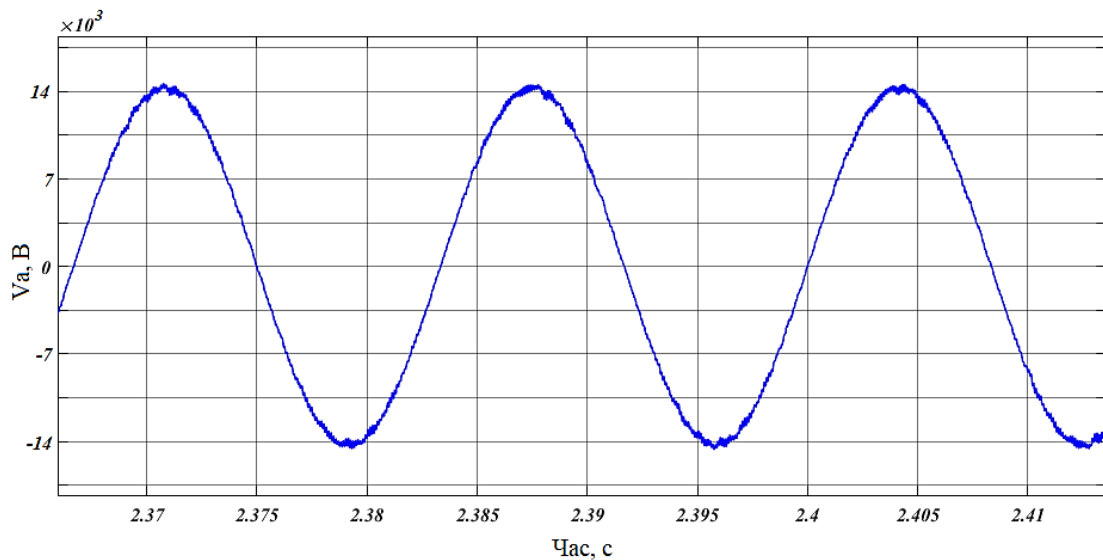


Рисунок 3.26 – Форма напруги в точці РСС для варіанту 3

У цьому випадку навантаження вважається 50 кВт для аналізу поведінки акумуляторів під час заряджання, коли потужність, що генерується фотоелектричною системою, перевищує необхідну потужність. Загальний потік потужності показано на рисунку 3.27.

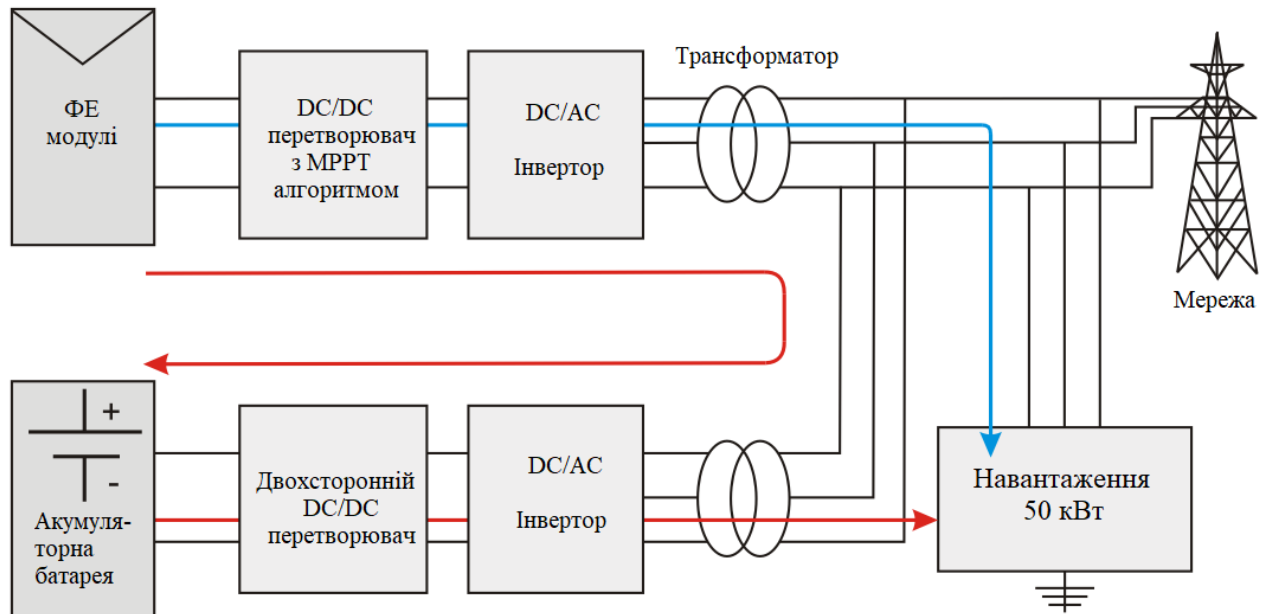


Рисунок 3.27 – Схема потоку енергії, що показує заряджання та розряджання акумуляторів на навантаження

У цьому випадку фотоелектрична система починає генерувати 100 кВт енергії, підключене навантаження становить 50 кВт, а решта енергії заряджає акумулятори, як показано на рисунку 3.28. Протягом часу від $t=0$ с до $t=3$ с фотоелектрична система генерує постійну потужність, і батареї починають заряджатися. Хоча для стабільної зарядки батарей від фотоелектричної системи потрібно менше секунди, цей процес можна поліпшити, вдосконаливши систему управління САЕЕ. Точне управління є складним процесом, тому в цій роботі воно не розглядається. Вдосконалення контролера може поліпшити загальну якість електроенергії системи PV-САЕЕ. Протягом короткого періоду часу, при $t=6$ с, потужність, що генерується фотоелектричною системою, майже дорівнює 0, і вся потужність, що подається на навантаження, забезпечується системою САЕЕ. Аналогічні характеристики розряджання та заряджання можна спостерігати на рисунку 3.28.

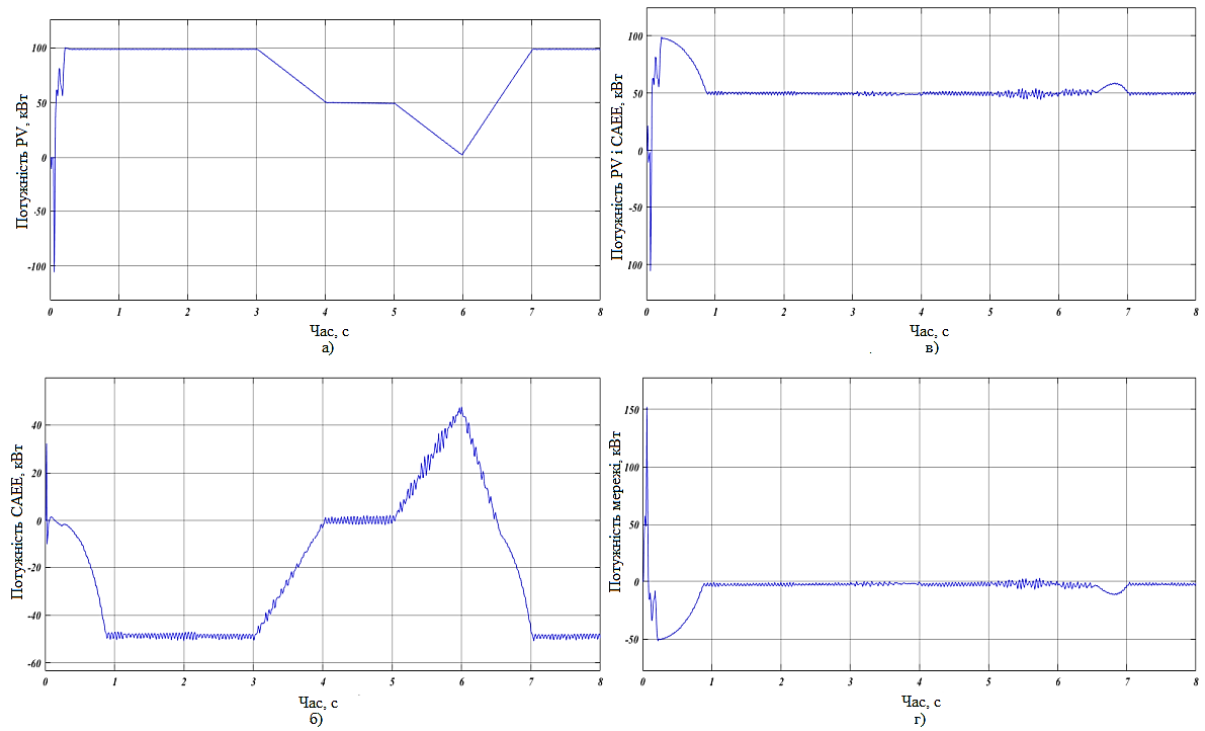


Рисунок 3.28 – Подача потужності до навантаження від фотоелектричної панелі, акумуляторної системи та мережі змінного струму

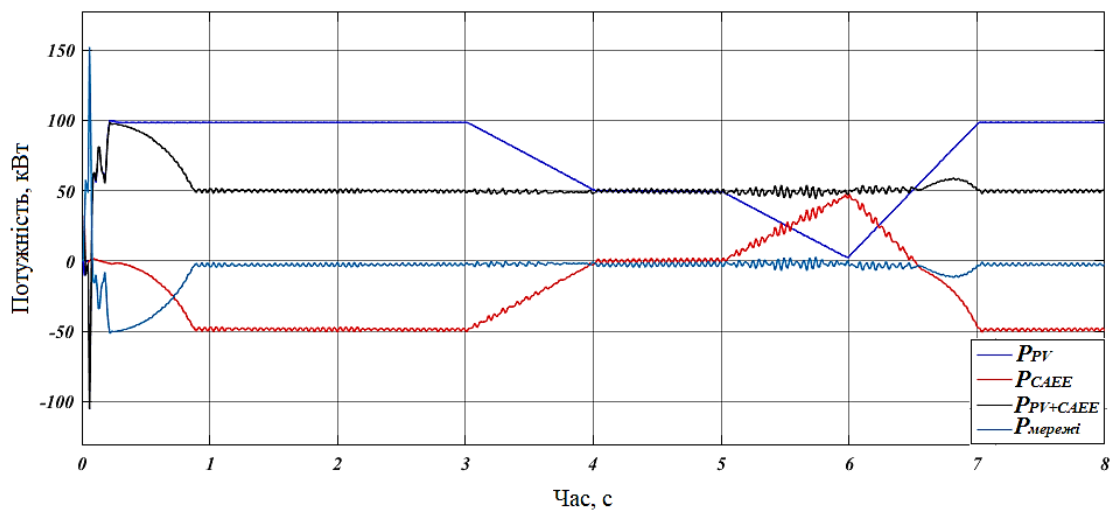


Рисунок 3.29 – Виробництво електроенергії всією системою на одній діаграмі

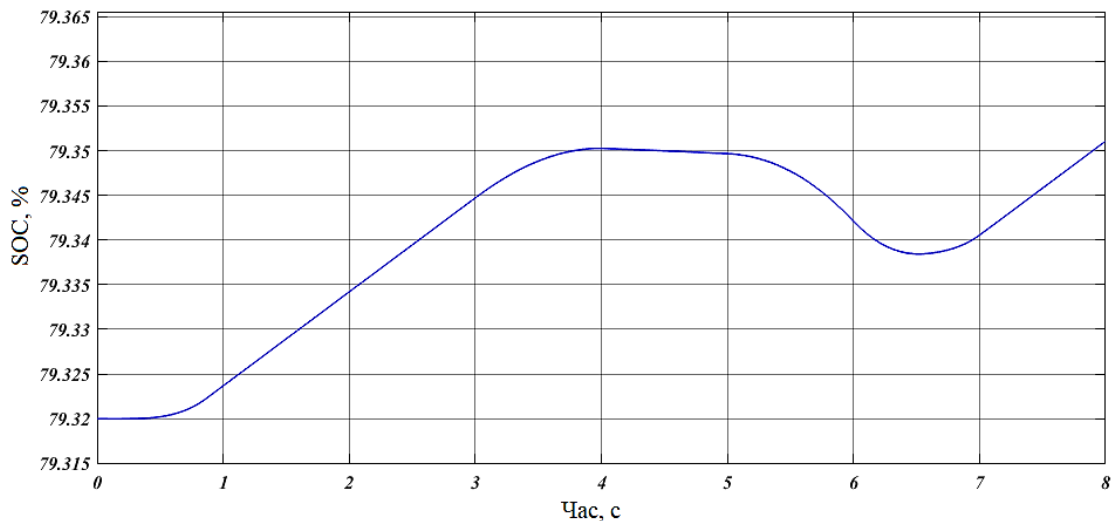


Рисунок 3.30 – Стан заряду (%) акумулятора

3.3 Висновки до розділу

У третьому розділі кваліфікаційної роботи представлено результати комп'ютерного моделювання комбінованої фотоелектричної системи з системою акумулювання електроенергії (PV-CAEE), виконаного в середовищі MATLAB Simulink.

1. Проведено аналіз продуктивності фотоелектричної панелі SunPower SPR-305E-WHT-D та сформованого з нього масиву потужністю 100,7 кВт. Встановлено, що вихідний струм фотоелектричної панелі має майже лінійну залежність від інтенсивності сонячного випромінювання, тоді як напруга змінюється незначно. Зменшення інсоляції з 1000 Вт/м² до 250 Вт/м² призводить до суттєвого зниження вихідної потужності модуля. Підвищення температури комірки від 25 °С до 50 °С зменшує потужність фотоелектричної панелі з 100,7 кВт до 93 кВт, що підтверджує негативний вплив перегріву на ефективність фотоелектричного перетворення.

2. У ході моделювання фотоелектричної системи у стаціонарному режимі при стандартних умовах тестування досягнуто номінальної вихідної потужності 100,7 кВт. Алгоритм відстеження точки максимальної потужності (MPPT) забезпечує коректне регулювання робочого циклу підвищувального перетворювача ($D = 0,545$) для підтримки оптимальної роботи фотоелектричної

панелі. У режимі змінних умов експлуатації MPPT продовжує відстежувати максимальну потужність при коливаннях інтенсивності сонячного випромінювання, що підтверджує його ефективність.

3. Досліджено три сценарії роботи об'єднаної системи PV-САЕЕ. У сценарії постійної генерації фотоелектричної системи роль акумуляторної батареї зводиться до стабілізаційних процесів. У сценарії дефіциту потужності фотоелектричної системи система акумуляування енергії компенсує нестачу шляхом розрядження акумулятора, забезпечуючи безперервне живлення навантаження. У випадку коли є надлишок потужності, коли фотоелектрична система генерує 100 кВт при навантаженні 50 кВт, надлишкова енергія спрямовується на зарядження акумуляторної батареї, що дозволяє використовувати її в подальшому при зниженій інсоляції.

4. Таким чином, результати моделювання підтверджують, що інтеграція системи акумуляування електроенергії з фотоелектричною установкою підвищує надійність енергопостачання, згладжує переривчастість генерації відновлюваної енергії та покращує загальну ефективність енергетичного комплексу. Разом з тим виявлено, що форми напруги та струму в точці загального з'єднання з мережею не є чисто синусоїдальними, що потребує подальшого вдосконалення алгоритмів управління контролером САЕЕ та інвертором.

5. Практична цінність роботи полягає в розробленні функціональної моделі PV-САЕЕ, яка може бути використана при проектуванні автономних та мережевих фотоелектричних станцій з накопиченням енергії. Подальші дослідження доцільно спрямувати на оптимізацію системи управління перетворювачем Кука, вдосконалення якості електроенергії на виході інвертора та врахування деградації акумуляторної батареї в процесі тривалої експлуатації.

4 БЕЗПЕКА ЖИТТЄДІЯЛЬНОСТІ, ОСНОВИ ОХОРОНИ ПРАЦІ

4.1 Основні вимоги безпеки до улаштування та експлуатації технологічного обладнання

Загальні вимоги безпеки до конструкції виробничого обладнання встановлені ДНАОП.

Безпека виробничого обладнання забезпечується [23]:

- при проектуванні - дотриманням принципів технологічності і ергономічності конструкції, застосуванням раціональних кінематичних схем, принципу безперервності процесу, дистанційного або автоматичного управління, забезпеченням запобіжними та захисними системами;
- при виготовленні - застосуванням сучасних технологій машинобудування, дотриманням передбачених допусків та посадок;
- при збірці та монтажі - точним дотриманням технології;
- при експлуатації - своєчасним обслуговуванням та профілактичними оглядами, дотриманням експлуатації, тощо.

Виробниче обладнання має бути пожежо- і вибухобезпечним. Воно не повинно створювати небезпеки в результаті дії вологості, сонячної радіації, механічних коливань, високих і низьких тисків і температур, агресивних речовин і мікроорганізмів.

Важливою умовою безпечної експлуатації обладнання є дотримання вимог санітарних норм і правил, галузевих стандартів і правил техніки безпеки щодо розмірів виробничих приміщень, галерей і тунелів, мінімальної висоти до низу виступаючих будівельних конструкцій, ширини проходів.

Рухомі частини обладнання, що є джерелом небезпеки, повинні бути огорожені, за виключенням частин, огороження яких не допускається за їх функціональним призначенням. У цих випадках передбачається сигналізація, що попереджує про пуск машин в роботу, засоби зупинки і відключення джерел енергії. При наявності машин значної довжини (наприклад, транспортерів)

засоби зупинки повинні розміщуватись не рідше як через кожні 10 м їх довжини.

Елементи конструкцій виробничого обладнання не повинні мати гострих кутів, кромок і поверхонь з нерівностями, що становлять собою джерело небезпеки, якщо їх наявність не визначається функціональним призначенням обладнання.

Конструкція обладнання повинна виключати можливість випадкового дотику працюючих до гарячих і переохолоджених частин. Виділення і поглинання обладнанням тепла, а також виділення їм вологи у виробничих приміщеннях не повинно перевищувати гранично допустимі! рівні (концентрації) в межах робочої зони.

4.2 Заходи безпеки при монтажі енергоустановок

Роботи в електроустановках, що стосується заходів безпеки, діляться на три категорії [23]: 1) зі зняттям напруги; 2) без зняття напруги на струмовідних частинах і поблизу них; 3) без зняття напруги не на струмовідних частинах, що знаходяться під напругою.

У випадку одночасної роботи в електроустановках напругою до і понад 1000 В категорії робіт визначаються як для установок більше 1000 В.

До робіт, які виконуються зі зняттям напруги, належать роботи, які здійснюються в електроустановці (або її частини), в якій з струмопровідних частин знято напругу і доступ в електроустановки (або їх частини), що знаходяться під напругою, стало неможливим.

До робіт, які виконуються без зняття напруги на струмопровідних частинах і поблизу них, належать роботи, що проводяться безпосередньо на цих частинах. Роботи без зняття напруги на струмопровідних частинах і поблизу них слід виконувати не менше як двом працівникам, з яких керівник робіт повинен мати групу IV, інші - групу III.

В електроустановках напругою понад 1000 В роботи без зняття напруги на струмопровідних частинах і поблизу них слід виконувати із застосуванням засобів захисту для ізоляції працівника від струмопровідних частин або від землі. У випадку ізоляції працівника від землі роботи слід виконувати згідно спеціальних інструкцій або технологічними картами, в яких передбачені необхідні заходи безпеки.

Під час роботи в електроустановках напругою до 1000 В без зняття напруги на струмопровідних частинах або поблизу від них необхідно:

- захистити розташовані поблизу робочого місця інші струмопровідні частини, які знаходяться під напругою, і до яких можливо випадковий дотик;
- працювати в діелектричній взуття, стоячи або на ізолювальних підставці або на діелектричному килимі;
- застосовувати інструмент з ізолювальними рукавами (у викруток, крім того, повинен бути ізольований стрижень); за відсутності такого інструменту слід користуватися діелектричними рукавичками.

Під час виконання робіт без зняття напруги на струмопровідних частинах за допомогою ізолювальних засобів захисту необхідно:

- Тримати ізолювальні частини засобів захисту за рукави до обмежувального кільця;
- Розміщувати ізолювальні частини засобів захисту так, щоб не виникла небезпека перекриття по поверхні ізоляції між струмопровідними частинами двох фаз чи замикання на землю;
- Користуватися тільки сухими і чистими ізолювальними частинами засобів захисту з непошкодженим лаковим покриттям.

У разі виявлення порушень лакового покриття чи інших несправностей ізолювальних частин засобів захисту користування ними забороняється.

У процесі роботи із застосуванням електрозахисних засобів (ізолювальні штанги та кліщі, електровимірювальні кліщі, покажчики напруги) допускається наближення працівника до струмопровідних частин на відстань, яка визначається довжиною ізолювальної частини цих коштів.

Всі працівники, які знаходяться у приміщеннях з чинним електрообладнанням електростанцій і підстанцій (за винятком щитів керування релейних та їм подібних приміщень), в ЗРУ, ВРУ, в колодязях, тунелях і траншеях зобов'язані користуватися захисними касками.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У результаті виконання кваліфікаційної роботи бакалавра на тему: «Використання системи акумулювання енергії для підвищення якості електропостачання від фотоелектричної станції», можна зробити такі висновки:

1. Проведено аналітичний огляд сучасного стану розвитку фотоелектричної енергетики як перспективного напрямку відновлюваної енергетики.

2. Проаналізовано вплив зовнішніх факторів – температури навколишнього середовища та інтенсивності сонячного випромінювання – на робочі характеристики фотоелектричної комірки.

3. Розглянуто питання об'єднання окремих фотоелектричних комірок у модулі та масиви для отримання необхідних рівнів напруги, струму та потужності.

4. Окремо висвітлено роль акумуляторних систем у забезпеченні надійності роботи фотоелектричних установок. Розглянуто їх складові компоненти та принципи збереження електроенергії шляхом зворотних електрохімічних реакцій, що створює підґрунтя для подальшого моделювання та проектування конкретної фотоелектричної системи.

5. Розроблено структурну схему досліджуваної системи PV-CAEE, яка складається з двох взаємопов'язаних підсистем: фотоелектричної генерації (PV-панель потужністю 100 кВт) та системи акумулювання енергії на літій-іонних акумуляторах (CAEE). Наведено параметри всіх ключових компонентів: підвищувального перетворювача постійного струму, 3-рівневого 3-фазного інвертора на базі IGBT, трансформатора 230 В/10 кВ, а також конденсаторної батареї 10 кВАр для фільтрації гармонік.

6. Представлено результати комп'ютерного моделювання комбінованої фотоелектричної системи з системою акумулювання енергії (PV-CAEE), виконаного в середовищі MATLAB Simulink. Встановлено, що вихідний струм

PV-панелі має майже лінійну залежність від інтенсивності сонячного випромінювання, тоді як напруга змінюється незначно. Зменшення інсоляції з 1000 Вт/м^2 до 250 Вт/м^2 призводить до суттєвого зниження вихідної потужності. Підвищення температури з $25 \text{ }^\circ\text{C}$ до $50 \text{ }^\circ\text{C}$ зменшує потужність з $100,7 \text{ кВт}$ до 93 кВт , що підтверджує негативний вплив перегріву на ефективність.

7. У ході моделювання фотоелектричної системи у стаціонарному режимі при стандартних умовах тестування досягнуто номінальної вихідної потужності $100,7 \text{ кВт}$. Алгоритм MPPT забезпечує коректне регулювання робочого циклу підвищувального перетворювача ($D = 0,545$) для підтримки оптимальної роботи. У режимі змінних умов MPPT продовжує відстежувати максимальну потужність.

8. Досліджено три варіанти роботи об'єднаної системи PV-CAEE. У сценарії постійної генерації роль акумуляторної батареї зводиться до стабілізаційних процесів. У сценарії дефіциту потужності CAEE компенсує нестачу шляхом розрядження, забезпечуючи безперервне живлення. У випадку надлишку потужності (100 кВт при навантаженні 50 кВт) надлишкова енергія спрямовується на заряджання акумуляторної батареї.

9. Результати моделювання підтверджують, що інтеграція системи акумулювання енергії з фотоелектричною установкою підвищує надійність та якість енергопостачання, згладжує переривчастість генерації відновлюваної енергії та покращує загальну ефективність енергетичного комплексу.

10. Практична цінність роботи полягає у розробці функціональної моделі PV-CAEE, яка може бути використана при проектуванні автономних та мережевих фотоелектричних станцій з накопиченням енергії.

11. Подальші дослідження доцільно спрямувати на оптимізацію системи управління перетворювачем Кука та врахування деградації акумуляторної батареї у процесі тривалої експлуатації.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Тарасенко М.Г., Коваль В.П., Буняк О.А., Мовчан Л.Т. Методичні вказівки до виконання кваліфікаційної роботи бакалавра для здобувачів першого рівня вищої освіти за ОПП Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка/ В.П. Коваль, М.Г. Тарасенко, О.А. Буняк, Л.Т. Мовчан – Тернопіль: ТНТУ, 2024. – 50 с.
2. Малушенко А.С. Перспектива зарядки електромобілів від відновлювальних джерел енергії // А. С. Малушенко; М.Б. Горват; В. П. Коваль / Актуальні задачі сучасних технологій : зб. тез доповідей XII міжнар. наук.-практ. конф. Молодих учених та студентів, (Тернопіль, 6-7 грудня 2023) / М-во освіти і науки України, Терн. націон. техн. ун-т ім. І. Пулюя [та ін.]. – Тернопіль: ФОП Паляниця В. А., 2023. – С. 225.
3. Коваль В. П. Енергетична ефективність систем позиціонування плоских сонячних панелей / В. П. Коваль, Р. Р. Івасечко, К. М. Козак // Енергозбереження. Енергетика. Енергоаудит. – 2015. – № 3. – С. 2-10
4. Коваль В.П. Автоматизована вимірювальна установка для дослідження електричних характеристик фотоелектричних модулів / В.П. Коваль, Б.Я. Оробчук, Я.М. Осадца, Л.М. Костик // Вісник Хмельницького національного університету – 2022. - №5. – С.168–173
5. Коваль В. П. Енергоефективність системи позиціонування фотоелектричних батарей / В. П. Коваль, Р. Р. Івасечко, Ю. О. Пилипчук // Збірник тез доповідей VI Міжнародної науково-технічної конференції молодих учених та студентів „Актуальні задачі сучасних технологій“, 16-17 листопада 2017 року. — Т. : ТНТУ, 2017. — Том 3. — С. 139.
6. Measuring device for photovoltaic modules electrical characteristics testing / Vadym Koval, Bogdan Orobchuk, Nataliia Kuzemko, Gao Lijin // ICAAEIT 2021, 15-17 December 2021. — Tern.: TNTU, Zhytomyr «Publishing house „Book-Druk“» LLC, 2021. — P. 14–19

7. Іме А.Н. Підвищення ефективності сонячних панелей шляхом використання водяного охолодження/Аях Нсікак Іме, В.П. Коваль//Збірник тез доповідей ІХ Міжнародної науково-технічної конференції молодих учених та студентів „Актуальні задачі сучасних технологій —, 25-26 листопада 2020 року.—Т.: ТНТУ, 2020.—Том 2.— С. 80–81
8. Малушенко А.С. Перспектива зарядки електромобілів від відновлювальних джерел енергії // А. С. Малушенко; М.Б. Горват; В. П. Коваль / Актуальні задачі сучасних технологій : зб. тез доповідей XII міжнар. наук.-практ. конф. Молодих учених та студентів, (Тернопіль, 6-7 грудня 2023) / М-во освіти і науки України, Терн. націон. техн. ун-т ім. І. Пулюя [та ін.]. – Тернопіль: ФОП Паляниця В. А., 2023. – С. 225.
9. Коваль В. Залежність енергоефективності сонячних елементів від експлуатаційних факторів / В. Коваль // Збірник тез доповідей XVII наукової конференції ТНТУ ім. Івана Пулюя, 20-21 листопада 2013 року. — Т. : ТНТУ, 2013. — Том I : Природничі науки та інформаційні технології. — С. 53
- 10.Герєга С. Збільшення ефективності використання сонячних панелей / Степан Герєга, Вадим Коваль, Ярослав Філюк // Матеріали III Всеукраїнської науково-технічної конференції „Теоретичні та прикладні аспекти радіотехніки і приладобудування“, 8-9 червня 2017 року. — Т. : ТНТУ, 2017. — С. 202
- 11.Messenger, R. A. (2018). Photovoltaic systems engineering. CRC press.
- 12.Luque, A., & Hegedus, S. (Eds.). (2011). Handbook of photovoltaic science and engineering. John Wiley & Sons.
- 13.Коваль В. П. Суміщене електропостачання від поновлювальних джерел енергії / Вадим Коваль // Матеріали IV Міжнародної науково-технічної конференції „Теоретичні та прикладні аспекти радіотехніки, приладобудування і комп’ютерних технологій— присвячена 80-ти

річчю з дня народження професора Я.І. Проця, 20-21 червня 2019 року.
— Т. : ФОП Паляниця В. А., 2019. — С. 294

14. Грицюк М.Я. Переваги концентруючих фотоелектричних електростанцій // М.Я. Грицюк; В.П. Коваль / Фундаментальні та прикладні проблеми сучасних технологій: Матеріали Міжнародної науково-технічної конференції "Фундаментальні та прикладні проблеми сучасних технологій", присвячена 180-річчю з дня народження Івана Пулюя та 65-річчю з дня заснування Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя, 28-29 травня 2025 року – Тернопіль. ТНТУ ім.І.Пулюя, 2025. – С. 29-30.
15. Понтус О.В. Особливості проектування та введення в експлуатацію промислової сонячної електростанції // О.В. Понтус, Р.А. Карпишин, В.П.Коваль / Світлотехніка й електроенергетика: історія, проблеми, перспективи: матеріали VII Міжнародної науково-технічної конференції, (Тернопіль, 29-31 травня 2024) / М-во освіти і науки України, Терн. націон. техн. ун-т ім. І. Пулюя [та ін.]. – Тернопіль: ФОП Паляниця В. А., 2024. – С 19-21.
16. Коваль В.П. Фотоелектрична станція для забезпечення власних потреб // В.П. Коваль, Д.Ф.Паловці, Abul Kalam Azad / Світлотехніка й електроенергетика: історія, проблеми, перспективи: матеріали VII Міжнародної науково-технічної конференції, (Тернопіль, 29-31 травня 2024) / М-во освіти і науки України, Терн. націон. техн. ун-т ім. І. Пулюя [та ін.]. – Тернопіль: ФОП Паляниця В. А., 2024. – С .
17. Робота фотоелектричної станції на основі гібридного інвертора з різною ємністю системи накопичення електроенергії. Коваль, В., Орбчук, Б., Буняк, О., Гетманюк, В. Вісник Хмельницького національного університету. Серія: технічні науки. 343(6(1), (2024). С. 208-214. Галузь науки: технічні (17.03.2020)

- 18.Гнатюк В.В. Роль систем зберігання електроенергії для енергосистеми // В.В. Гнатюк; В.І. Кузьмич; В.П.Коваль / Фундаментальні та прикладні проблеми сучасних технологій: Матеріали Міжнародної науково-технічної конференції "Фундаментальні та прикладні проблеми сучасних технологій", присвячена 180-річчю з дня народження Івана Пулюя та 65-річчю з дня заснування Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя, 28-29 травня 2025 року – Тернопіль. ТНТУ ім.І.Пулюя, 2025. – С. 21-22.
- 19.Коваль В.П. Інтегрування електроавтомобіля у систему електроживлення будинку // В.П. Коваль, к.т.н. доц; А.В. Слободян; К.В. Слободян / Фундаментальні та прикладні проблеми сучасних технологій: Матеріали Міжнародної науково-технічної конференції "Фундаментальні та прикладні проблеми сучасних технологій", присвячена 180-річчю з дня народження Івана Пулюя та 65-річчю з дня заснування Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя, 28-29 травня 2025 року – Тернопіль. ТНТУ ім.І.Пулюя, 2025. – С. 36-37
- 20.Коваль В.П. Вплив ємності акумулятора на ефективність роботи фотоелектричної станції//В.П.Коваль / Інноваційні технології в світлотехніці та електроенергетиці : матеріали Міжнар. наук.-практ. конф., Харків, 16–17 трав. 2024 р. / Нац. акад. наук вищ. освіти України, Харків. нац. ун-т міськ. госп-ва ім. О. М. Бекетова, Нац. наук. центр «Ін-т метрології» [та ін.]. – Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2024. – С. 75-77.
- 21.Керя Ю.Б. Роль системи накопичення енергії у електроенергетичній системі //Ю.Б.Керя, В.П.Коваль /Актуальні задачі сучасних технологій : зб. тез доповідей XI міжнар. наук.-практ. конф. Молодих учених та студентів, (Тернопіль, 7–8 груд. 2022.) / М-во освіти і науки

- України, Терн. націон.техн. ун-т ім. І. Пулюя [та ін.]. – Тернопіль: ФОП Паляниця В. А., 2022. – С. 68.
- 22.MathWorks, I. (2021). Detailed Model of a 100-kW Grid-Connected PV Array. MathWorks, INC.
- 23.Abdulkadir, M., Samosir, A. S., & Yatim, A. H. M. Modelling and Simulation of Maximum Power Point Tracking of Photovoltaic System in Simulink model|| 2012 IEEE International Conference on Power and Energy (PECon), 2-5 December 2012. Kota Kinabalu Sabah, Malaysia.
- 24.Гандзюк, М. П. Основи охорони праці [Текст] : підручник / М. П. Гандзюк, Є. П. Желібо, М. О. Халімовський ; за ред. М. П. Гандзюка ; МОН України. – 4-е видання. – К. : Каравела, 2008. – 384 с.