

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

Другий (Магістерський)

Освітній рівень

Галузь знань 15 Автоматизація та приладобудування

Шифр і назва

Спеціальність 151 Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології

Шифр і назва

Освітня програма 151 Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології

Шифр і назва

на тему «Метод керування оптимізатором сонячної панелі»

КвРАКІТ. 2021064.01.02.ПЗ

Виконав:

студент 2 курсу, група АКІТ_м-21-1



Підпис

Аліна ГРЕБІНЧУК

Ім'я, ПРІЗВИЩЕ

Керівник:

д-р техн. наук, проф.



Підпис

Валерій МАРТИНІУК

Ім'я, ПРІЗВИЩЕ

Нормоконтролер



Підпис

Людмила КОРЕЦЬКА

Ім'я, ПРІЗВИЩЕ

До захисту допускаю:

Зав. кафедри: д-р техн. наук, проф.



Підпис

Валерій МАРТИНІУК

Ім'я, ПРІЗВИЩЕ

8 грудня

2022 р.

Хмельницький, 2022

Хмельницький національний університет

Факультет інформаційних технологій

Кафедра автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій й

Освітній рівень другий (магістерський)


Галузь знань 15 – Автоматизація та приладобудування

Спеціальність 151 – Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології

Освітня-професійна програма Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології

ЗАТВЕРДЖУЮ

Зав. кафедрою АКІТ

 Мергімов В.В.
« 1 » 07 2022 р.

ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

Гребінчук Аліні Дмитрівні

1 Тема роботи: Метод керування оптимізатором сонячної панелі
керівник роботи Мартинюк Валерій Володимирович, д.т.н, професор.

Затверджено наказом по університету від «1» липня 2022р. № 83.

2 Строк подання студентом роботи на кафедру: 02.12.2022р.

3 Вихідні дані (характеристика об'єкта, умов дослідження та ін.)

Мета роботи: розробка методу керування оптимізатором сонячної панелі.

Об'єкт дослідження: процес керування оптимізатором сонячної панелі.

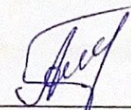

Предмет дослідження: удосконалення методу керування оптимізатором сонячної панелі.

4. Зміст пояснювальної записки (перелік питань, що їх належить розробити)





Вступ. Огляд літературних джерел та патентних даних. Удосконалений метод керування оптимізатором сонячної панелі. Імітаційна оптимізатора сонячної панелі. Експериментальне дослідження метода керування оптимізатором сонячної панелі. Висновки.

Завдання отримав _____

Науковий керівник _____

5. Консультанти розділів дипломного проекту (роботи)

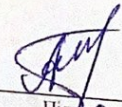
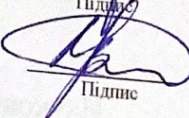
Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання при
Нормоконтроль	к.т.н, доцент Корецька.Л.О,		
Антиплагіат	к.т.н, доцент Федула.М.В		

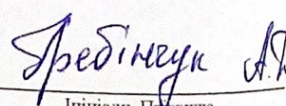
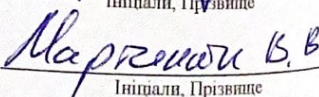
КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ п/п	Назва етапів (розділів) дипломної роботи	Строк виконання етапів дипломної роботи	Примітка
1	Вступ	10.09.2022р.	Виконано
2	Огляд літературних джерел та патентних даних	25.09.2022р.	Виконано
3	Удосконалений метод керування оптимізатором сонячної панелі	15.10.2022р.	Виконано
4	Імітаційна модель оптимізатора сонячної панелі	30.10.2022р.	Виконано
5	Експериментальне дослідження метода керування оптимізатором сонячної панелі	10.11.2022р.	Виконано
6	Висновки	15.11.2022р.	Виконано
6	Оформлення пояснювальної записки до КР	20.11.2022р.	Виконано
7	Оформлення презентаційних матеріалів	1.12.2022р.	Виконано

Студент

Керівник роботи


Підпис

Підпис


Ініціали, Прізвище

Ініціали, Прізвище

Зміст

ВСТУП.....	4
1 ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ ТА ПАТЕНТНИХ ДАНИХ.....	7
1.1 Будова фотогальванічного елемента.....	7
1.2 Фотогальванічні модулі.....	10
1.3 Математична модель фотогальванічного елемента.....	11
1.4 Методи відслідковування точки максимальної потужності.....	20
Висновки до першого розділу.....	26
2 МЕТОД КЕРУВАННЯ ОПТИМІЗАТОРОМ СОНЯЧНОЇ ПАНЕЛІ.....	28
2.1 Особливості розрахунку паралельного та послідовного опору сонячної панелі.....	28
2.2 Особливості методу керування оптимізатором сонячної панелі.....	34
2.3 Структурна схема оптимізатора сонячної панелі.....	39
2.4 Регулювання оптимізатора сонячної панелі.....	42
Висновки до другого розділу.....	47
3 ІМІТАЦІЙНА МОДЕЛЬ ОПТИМІЗАТОРА СОНЯЧНОЇ ПАНЕЛІ.....	49
3.1 Імітаційна модель сонячної панелі.....	49
3.2 Імітаційна модель оптимізатора сонячної панелі.....	59
Висновки до третього розділу.....	66
4 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ МЕТОДУ КЕРУВАННЯ ОПТИМІЗАТОРА СОНЯЧНОЇ ПАНЕЛІ.....	68
4.1 Експериментальна установка дослідження методу керування оптимізатора сонячної панелі.....	68
4.2 Методика експериментального дослідження методу керування оптимізатора сонячної панелі.....	70
Висновки до четвертого розділу.....	77
ВИСНОВКИ.....	78

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ.....	79
Додаток А Стаття у фаховому журналі.....	83
Додаток Б Презентація.....	88

ВСТУП

Актуальність теми. Актуальність сонячної енергетики полягає в тому, що традиційні джерела енергії – нафта, газ, кам'яне вугілля – згодом вичерпаються. За деякими оцінками, це відбудеться вже в найближчі десятиліття. Крім перспективи виснаження традиційних джерел існує ще й екологічна проблема, оскільки спалювання вуглеводневого палива призводить до шкідливих викидів в атмосферу, погіршуючи сферу проживання людини, створюючи екологічні проблеми.

Сонячна енергія є чистою та вільною від викидів, оскільки вона не виробляє забруднюючих речовин чи побічних продуктів, шкідливих для природи.

Основним способом підвищення ефективності сонячної панелі є використання методу пошуку точки максимальної потужності (ТМП), електронним пристроєм – оптимізатором сонячної панелі, що значно підвищує ефективність системи. Таким чином, ефективне керування оптимізатором сонячної панелі підвищує ефективність сонячних панелей, тим самим знижуючи загальну вартість системи.

Метою роботи є підвищення ефективності сонячних панелей шляхом розробки методу керування оптимізатором сонячної панелі в реальному масштабі часу.

Для досягнення цієї мети необхідно розв'язати такі **завдання**:

- розробити структурну схему оптимізатора сонячної панелі;
- розробити імітаційну модель методу керування оптимізатором сонячної панелі;
- розробити метод керування оптимізатором сонячної панелі.

Об'єктом дослідження є процес керування оптимізатором сонячної панелі.

Предметом дослідження є розробка методу керування оптимізатором сонячної панелі.

Методи досліджень. При вирішенні поставлених завдань у роботі були використані методи фізики, теорії автоматичного керування, методи обчислювальної математики, а також методи алгоритмізації та програмування.

Наукова новизна отриманих результатів:

1. Розроблено метод керування оптимізатором сонячної панелі, який базується на розрахунку струму в точці максимальної потужності I_{mp} та напруги в точці максимальної потужності U_{mp} при вимірних значеннях інтенсивності сонячного випромінювання та температури сонячної панелі.

Практична значимість отриманих результатів:

У роботі розроблена імітаційна модель оптимізатора сонячної панелі в середовищі Simulink, до складу якої ходять дві імітаційних моделі сонячних панелей CL-P72295 китайської компанії ABISOLAR, одна з оптимізатором сонячної панелі, а інша без нього.

Апробація результатів дослідження: Результати досліджень представлені у вигляді статті у фаховому журналі «Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах» №4 2022р.

Кваліфікаційна робота складається із вступу, чотирьох розділів, висновків до кожного розділу, висновків, списку використаних джерел, 2 додатків. Загальний обсяг роботи складає 107 сторінки комп'ютерного тексту, у тому числі: 38 рисунок та 4 таблиць, список використаних джерел вміщує 36 найменувань.

У вступі обґрунтована актуальність наукової задачі, сформульовано мету та задачі досліджень, відображено основні наукові результати та їх практичне значення.

У першому розділі кваліфікаційної роботи проаналізовано основні методи відслідковування точки максимальної потужності: метод постійної напруги,

метод холостого ходу за напругою, метод короткого замикання за струмом, метод приросту провідності та метод збурення і спостереження.

У другому розділі запропоновано метод керування оптимізатором сонячної панелі базується на розрахунку струму в точці максимальної потужності I_{mp} та напруги в точці максимальної потужності U_{mp} при вимірних значеннях інтенсивності сонячного випромінювання та температури сонячної панелі.

У третьому розділі кваліфікаційної роботи виконано імітаційне моделювання оптимізатора сонячної панелі в середовищі Simulink, до складу якої ходять дві імітаційних моделі сонячних панелей CL-P72295 китайської компанії ABISOLAR, одна з оптимізатором сонячної панелі, а інша без нього.

У четвертому розділі кваліфікаційної роботи виконано експериментальне дослідження методу керування оптимізатором сонячної панелі двома методами. У загальних висновках по кваліфікаційній роботі висвітлені основні результати досліджень, які отримані у кваліфікаційній роботі магістра.

1. ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ ТА ПАТЕНТНИХ ДАНИХ

1.1. Будова фотогальванічного елемента

Процес роботи фотогальванічного елемента, досить складний: світло збуджує електрони для переходу від одного шару до іншого через кремнієві напівпровідні матеріали. Це, зрештою, створює електричний струм. Цей процес називається фотоелектричним ефектом (рисунок 1.1) [1].

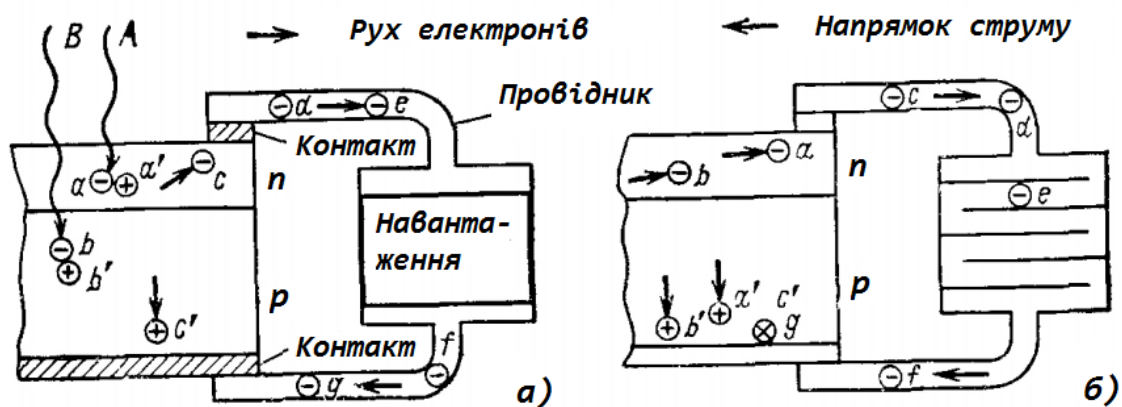


Рисунок 1.1 – Принцип роботи фотогальванічного елемента

Фотогальванічні елементи називаються фотоелектричними і виготовляються з тонких шарів кристалічного кремнію, арсеніду галія або інших напівпровідникових матеріалів, які здатні перетворювати сонячне випромінювання безпосередньо в електричний струм.

Для отримання ефекту фотопровідності необхідно об'єднати напівпровідники двох типів, з n та p-провідністю. Перший тип має надлишок електронів, другий їх нестачу. В результаті, фотоелемент складається з двох шарів напівпровідників із різною провідністю.

Принцип роботи такого елемента відбувається наступним чином. На p-провідник (його розташовують вгорі структури) падають сонячні промені і вибивають електрони з атомарних орбіт. За рахунок додаткового енергоімпульсу

вони переходять до р-провідника (ширину зони переходу підбирають невеликою, щоб електрони змогли її подолати) і формують спрямований потік.

По суті, такий двошаровий елемент для сонячних батарей є чимось на кшталт електродної батареї, причому в ролі катода виступає n-напівпровідник, а в ролі анода - р- напівпровідник. Для зняття фотоструму до напівпровідникових пластин припаюють тонкі провідники та навантаження [2-4].

На основі кремнію випускаються фотогальванічні елементи трьох типів: з полікристалів, монокристалів і на тонких плівках. У кожного з цих різновидів фотогальванічних елементів є свої робочі показники, особливості та сфери використання.

Фотоелементи з полікристалічного кремнію.

Комірки з полікристалічного кремнію мають квадратну форму і неоднорідну поверхню темного (іноді – майже чорного) відтінку. Це обумовлюється тим, що в процесі вирощування полікристалів отримують заготовки у вигляді призми з квадратним перетином. Неоднорідність поверхні та структури визначається тим, що складаються такі заготовки з безлічі різномірних кристаликів. Крім того, у полікристалічному кремнію обов'язково присутня певна частка домішок.

ККД таких комірок дещо нижчий, ніж у монокристалічних комірок. Якщо ККД монокристалічних комірок перевищує 20%, то у полікристалічного кремнію ККД становить приблизно 17-18%.

Фотоелементи з монокристалічного кремнію.

Такі комірки виробляють з монокристалів високочистого кремнію (порядку 99,99%), тому вони мають правильну кристалографічну структуру і більш високі експлуатаційні показники.

З усіх існуючих сьогодні елементів сонячних батарей фотоелементи з монокристалічного кремнію мають найбільшу продуктивність. Пов'язано це з тим, що їх однорідна структура поступово поглинає сонячне світло і також

поступово перетворює його на фотострум. Відбиваючі втрати променів при цьому мінімальні, тому енергоефективність такого елемента залежить тільки від властивостей кристала (кількості та якості домішок, дотримання технології вирощування тощо).

Особливості монокристалічних сонячних батарей [5-9].

Рівномірність вихідних параметрів за різних погодних умов. Сучасні монокристалічні сонячні батареї практично не втрачають своєї ефективності за високої хмарності, як це було раніше.

Можливість використання у мороз. Монокристалічні сонячні батареї зберігають свій ККД і за мінусових температур, тому всі сонячні батареї всесезонного використання комплектують саме такими елементами.

Здатність витримати невеликий вигин. За рахунок рівномірної структури монокристалічні сонячні батареї мають незначну гнучкість. Ця властивість іноді використовується при монтажі геліопанелей.

Ціна сонячних елементів з монокристалічного кремнію лише трохи вище полікристалічних аналогів.

Фотоелементи з аморфного кремнію.

Сонячні осередки з аморфного кремнію також називають гнучкими панелями. Ця назва повністю відображає всі їхні особливості, і насамперед – гнучку тонкоплівкову структуру. Виробляють фотоелементи з аморфного кремнію шляхом вакуумного напилення напівпровідників на тонкоплівкову підкладку.

Зазвичай використовують аморфний кремній, але нерідко застосовують телурид кадмію або селенід індія. Крім того, ведуться розробки та використання органічних матеріалів.

ККД гнучких елементів визначається речовиною напівпровідника. Для кремнієвих виробів він дещо нижчий (близько 10%), для батарей на більш сучасних матеріалах (селенідах або телуридах) він досягає 15-20%.

Особливості тонкоплівкових елементів:

- можливість монтажу на будь-яких криволінійних формах;
- висока енергогенерація при розсіяному освітленні (за рахунок цього їх загальна продуктивність у певних умовах мало поступається кристалічним аналогам);
- мінімальна товщина (порядку 1мкм);
- мала собівартість виробництва та невисока вартість;
- висока енергоефективність у потужних системах (понад 10 кВт).

Тонкоплівкові сонячні батареї широко використовують у регіонах з переважанням похмурих погодних умов і в дуже спекотних країнах, а також у космічній промисловості. Єдиний недолік цих батарей – їх розміри, при однаковій потужності на виході, гнучкі панелі майже вдвічі більші за кристалічні.

1.2 Фотогальванічні модулі

Фотогальванічний елемент є головним будівельним блоком фотоелектричної системи. Окрема комірка зазвичай досить маленька і виробляє потужність близько 1 або 2 Вт. Для збільшення вихідної потужності сонячних комірок вони повинні бути з'єднані разом, щоб сформувати більші секції, які називаються фотогальванічними модулями [10-14].

Фотогальванічні модулі, у свою чергу, можуть бути з'єднані у більші системи, які називаються масивами і можуть бути з'єднані між собою для збільшення потужності. При послідовному з'єднанні комірок або фотогальванічних модулів, вихідна напруга може бути збільшена. З іншого боку, для досягнення більшого значення вихідного струму, комірки чи фотогальванічні модулі необхідно з'єднати паралельно (рисунок 1.2).

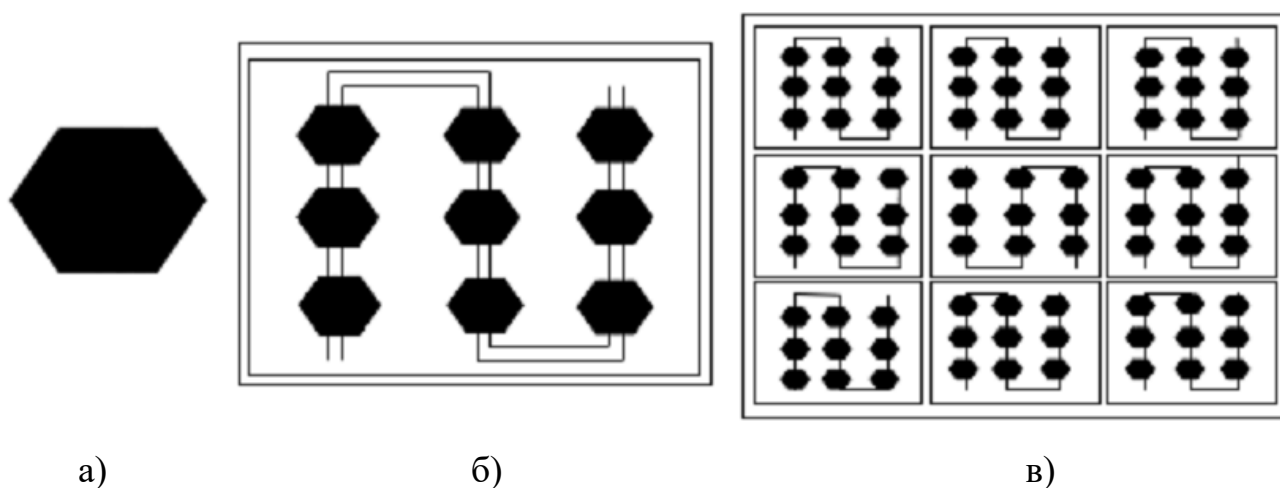


Рисунок 1.2 – З'єднання фотогальванічних елементів:
 а) фотогальванічний елемент; б) фотогальванічний модуль;
 в) фотогальванічна батарея

1.3 Математична модель фотогальванічного елемента

Використання еквівалентної електричної схеми заміщення (рисунок 1.3) дозволяє промоделювати характеристики фотогальванічного елемента. Модель фотогальванічного елемента складається із джерела фотоструму (I_{ph}), діода (D), паралельного опору (R_{sh}) та послідовного опору (R_s) [15-20].

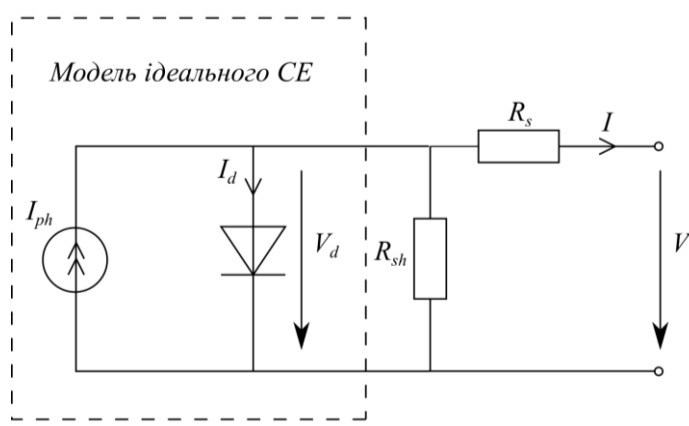


Рисунок 1.3 – Еквівалентна електрична схема заміщення фотогальванічного елемента

Нижче наведена залежність між струмом I та напругою V фотогальванічного елемента:

$$I = I_{ph} - I_s \left[\exp\left(\frac{q(V + IR_s)}{kTA}\right) - 1 \right] - \frac{V + IR_s}{R_{sh}}, \quad (1.1)$$

де $q = 1,602 \cdot 10^{-19}$ – заряд електрона;

$k = 1,381 \cdot 10^{-23}$ – постійна Больцмана;

A – коефіцієнт ідеальності діода (1~2);

I_s – струм насичення;

T – температура переходу.

Вольт-амперні характеристики (ВАХ) отримують шляхом опромінювання фотогальванічного елемента постійним рівнем світлового потоку, зберігаючи при цьому постійну температуру фотогальванічного елемента. Шляхом зміни опору навантаження, вимірюють струм. Вольт-амперні характеристики проходить через дві точки: струм короткого замикання (I_{CS}), коли виводи фотогальванічного елемента закорочені, а напруга між выводами дорівнює нулю. Це відповідає нульовому опору навантаження.

Напруга холостого ходу (U_{OC}), - це напруга між додатнім та від'ємним выводами фотогальванічного елемента в умовах розімкнутого кола, коли струм дорівнює нулю. Це відповідає нескінченному опору навантаження. Вольт-амперну характеристику фотогальванічного елемента зображено на рисунку 1.4.

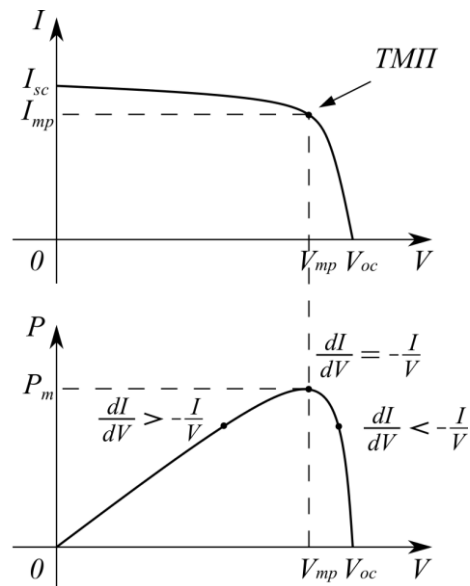


Рисунок 1.4 – Вольт-амперна та вольт-ватна характеристики фотогальванічного елемента

Для будь-якого заданого набору робочих умов фотогальванічний елемент має одну робочу точку, де значення струму (I) та напруги (U) фотогальванічного елемента призводять до максимальної вихідної потужності [21-26].

Потужність P визначається виразом $P=UI$. Графік залежності вихідної потужності панелі від напруги показано на рисунку 1.4, на якому максимальна точка позначена як ТМП (точка максимальної потужності).

В точці максимальної потужності крива графіка зменшується з обох боків і відповідає режиму, в якому фотогальванічний елемент працює з максимальною ефективністю та генерує максимальну вихідну потужність.

Коли фотогальванічний елемент безпосередньо з'єднаний з навантаженням, робоча точка фотогальванічного елемента перебуватиме на перетин вольт-амперної характеристики фотогальванічного елемента та вольт-амперної характеристики навантаження.

Графік перетину вольт-амперної характеристики фотогальванічного елемента та вольт-амперної характеристики навантаження зображено на рисунку 1.5. Перетин визначає робочу напругу і струм, а також потужність на

навантаженні R . На рисунку 1.5 показані навантажувальні лінії, проведені для трьох різних значень опору R .

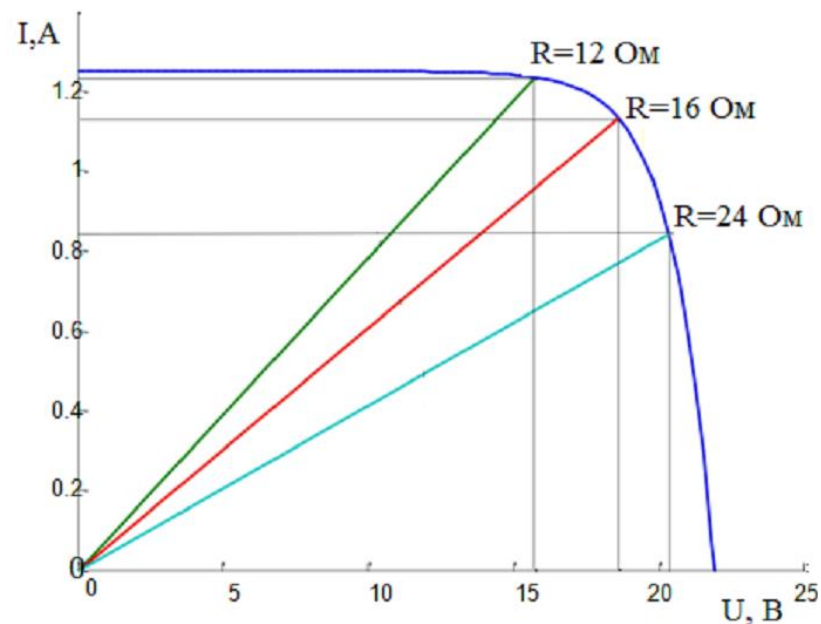


Рисунок 1.5 – Навантажувальні лінії, проведені для трьох різних значень опору R фотогальванічного елемента

Лінія навантаження для $R=16$ Ом перетинає вольт-амперну характеристику фотогальванічного елемента у точці максимальної потужності. У цьому режимі навантаження споживає максимальну потужність. Однак при будь-якому іншому значенні R точка перетину зміщується від точки максимальної потужності, а споживана потужність буде меншою від максимальної. Інакше кажучи, опір навантаження визначає робочий стан модуля [27-32].

Перетворювачі постійної напруги широко використовуються в джерелах живлення постійного струму і приводів постійного струму з метою перетворення нерегульованого вхідного сигналу постійного струму у вихідний керований струм, при бажаному рівні напруги.

Контролер точки максимальної потужності використовує перетворювач постійної напруги для регулювання напруги фотогальванічного елемента та

встановлення цієї напруги в точку максимальної потужності, забезпечуючи узгодження навантаження максимальної передачі потужності.

Він може забезпечити вихідну напругу вище або нижче за вхідну напругу. Метою перетворювача постійного струму є узгодження опору навантаження із оптимальним імпедансом сонячної панелі. Тим не менш, точка максимальної потужності не фіксована і змінюється в залежності від різних факторів, таких як освітленість і температура.

В паспортних даних фотогальванічного елемента часто використовуються два ключові параметри: струм короткого замикання (I_{SC}) та напруга холостого ходу (U_{OC}). У фотогальванічному елементі струм генерується фотонами і при постійній температурі та постійному випромінюванні світла струм фотогальванічного елемента є постійним. Змінюючи рівень випромінювання світла ми можемо отримати різні значення вихідного струму.

$$I_{ph} = \frac{G}{G_o} [1 - K_I (T - T_o)] I_{ph0}, \quad (1.2)$$

де $G_o = 1 \text{ кВт/м}^2$ – рівень випромінювання світла при стандартній температурі $T_o = 25^\circ\text{C}$;

K_I – температурний коефіцієнт, який визначає зміну струму короткого замикання при зміні температури від $T_o = 25^\circ\text{C}$.

Залежність вольт-амперної характеристики фотогальванічного елемента від рівня випромінювання світла зображено на рисунку 1.6.

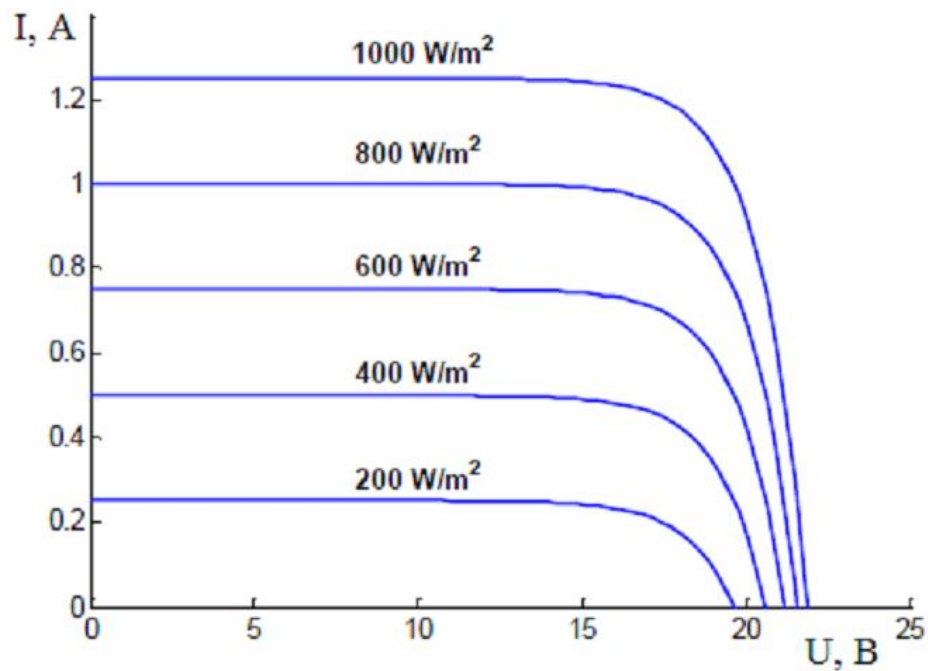


Рисунок 1.6 – Залежність вольт-амперної характеристики фотогальванічного елемента від рівня випромінювання світла

Враховуючи, що крива вольт-амперної характеристики фотогальванічного елемента залежить від рівня випромінювання світла, необхідно керувати положенням точки максимальної потужності для того, щоб отримати аксимальну потужність фотогальванічного елемента [33-36].

Вольт-амперна характеристика фотогальванічного елемента змінюється також за різних температур, як показано на рисунку 1.7.

$$I_s = \frac{I_{sc0}(1 + K_I \Delta T)}{\exp\left(\frac{V_{oc0}(1 + K_V \Delta T)}{mV_T}\right) - 1}, \quad (1.3)$$

де $\Delta T = T - T_0$;

K_V – температурний коефіцієнт, який визначає зміну напруги холостого ходу при зміні температури від $T_0 = 25^\circ\text{C}$.

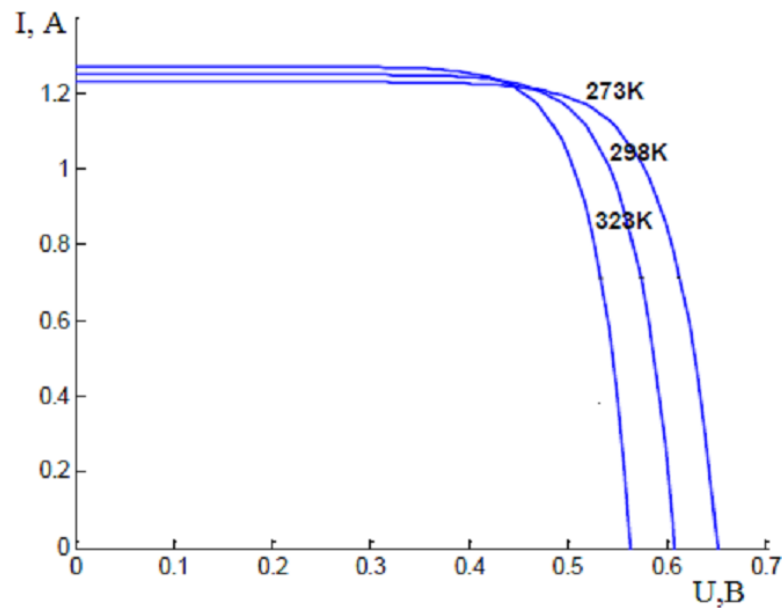


Рисунок 1.7 – Залежність вольт-амперної характеристики фотогальванічного елемента від температури

З підвищенням температури вольт-амперної характеристики фотогальванічного елемента зсувається вліво і точка максимальної потужності знижується.

Через фотоелектричну природу сонячних панелей, їх вольт-амперні характеристики залежать від температури та рівня освітленості.

Тому робочий струм і напруга, що становлять вихідну потужність, змінюватимуться залежно від умов довкілля.

Отже, точку максимальної потужності необхідно відстежувати за спеціальним алгоритмом. Алгоритм пошуку точки максимальної потужності повідомляє контролера, як змінити робочу напругу. Потім завдання контролера полягає в тому, щоб довести напругу до бажаного рівня та підтримувати його. Щоб отримати стабільну напругу від сонячних панелей, використовується DC-DC перетворювач.

Контролер фотогальванічного елемента - це електронний пристрій, що працює на базі чіпа, який контролює роботу системи та керує зарядом

акумулятора. Контролер фотогальванічного елемента не допускає повного розрядження акумулятора та його зайвого заряду.

Коли заряд акумулятора знаходиться на максимальному рівні, то величина струму від фотоелементів зменшується. В результаті подається струм, необхідний для компенсації саморозряду. Якщо акумулятор надто розряджений, то контролер відключить від нього навантаження.

Прості контролери (on/off, ШІМ контролери) підключають фотогальванічний елемент до акумулятора практично безпосередньо, і тому їхня напруга порівнюється. В реальності ж, оптимальна напруга фотогальванічного елемента в сонячну погоду завжди вища за напругу на акумуляторі, а в похмуру - нижче.

Таким чином, можна із запасом, свідомо збільшити напругу від фотогальванічного елемента порівняно з напругою на акумуляторі, з'єднавши їх послідовно. Тоді, в похмуру погоду напруга фотогальванічних елементів буде все ще вищою за напругу на акумуляторі, а в сонячну – набагато вищою.

Контролер із ШІМ.

Контролер із ШІМ - це послідовний контролер, який припиняє зарядку акумулятора, не закорочуючи фотогальванічних елементів. Його алгоритм роботи дозволяє досягати 100% зарядження акумулятора. Відбувається це у 4 етапи, які виконуються автоматично залежно від фактичного рівня заряду акумулятора:

1. Етап - основний заряд/накопичення. Акумулятор отримує повністю весь струм фотогальванічного елемента.

2. Етап - поглинаючий заряд/насичення. Коли напруга на акумуляторі досягає певного рівня, контролер починає підтримувати постійну напругу за рахунок ШІМ струму заряду. Це дозволяє уникнути перегріву та газоутворення в акумуляторі. Струм зменшується в міру заряду акумулятора.

3. Етап - підтримуючий заряд/рівновага. Акумулятор повністю заряджений, зарядна напруга зменшується для запобігання подальшого нагрівання або газоутворення в акумуляторі. Акумулятор підтримується у зарядженому стані.

4. Етап - врівноважуючий заряд (вирівнювання). Тільки для акумуляторів відкритого типу.

Контролер із пошуком точки максимальної потужності.

Технологія пошуку точки максимальної потужності є найефективнішою технологією сучасних контролерів заряду. Обчислення максимальної точки ефективності заряду від сонячних панелей дозволяє підвищити ККД використання сонячної енергії до 20-30% порівняно зі звичайними контролерами із ШІМ.

Етапи зарядки контролера із пошуком точки максимальної потужності є ідентичними етапам зарядки контролера з ШІМ. Але контролери із пошуком точки максимальної потужності є ще й перетворювачами вищої напруги фотогальванічних елементів у нижчу, яка потрібна для акумуляторів.

Перетворювач постійного струму на основі контролера із пошуком точки максимальної потужності – це пристрій заряду, що включає цифровий сигнальний контролер. Цифровий сигнальний контролер постійно стежить за струмом та напругою від фотогальванічних елементів.

Здійснює обробку цих даних і визначає напругу і струму, при яких потужність фотогальванічних елементів максимальна.

Основні переваги контролера із пошуком точки максимальної потужності у порівнянні з контролера із ШІМ:

- високий ККД;
- оптимальна робота при затіненні частини площі фотогальванічних елементів;
- підвищена віддача при слабкій освітленості та при хмарній погоді;

- підвищена віддача при підвищенні температури фотогальванічних елементів (що веде до зниження їх потужності), і при від'ємних температурах повітря (що, відповідно, веде до збільшення потужності);

- використання вищої вхідної напруги, що дозволяє зменшити переріз кабелів;

- дозволяє збільшити дистанцію від панелей до контролера.

Контролери із пошуком точки максимальної потужності дуже ефективні, їх ККД перетворення становить 97 - 98%.

1.4 Методи відслідковування точки максимальної потужності

Існує багато різних підходів до максимізації потужності фотогальванічних елементів. До основних методів відслідковування точки максимальної потужності відносяться наступні методи.

1. Метод постійної напруги.
2. Метод холостого ходу за напругою.
3. Метод короткого замикання за струмом.
4. Метод приросту провідності.
5. Метод збурення та спостереження.

Простим методом пошуку точки максимальної потужності є метод постійної напруги. Цей метод просто використовує одну напругу для знаходження U_{mp} . Метод постійної напруги складається з наступних етапів.

1. Встановлення постійної напруги на виводах фотогальванічного елемента.
2. Від'єднання навантаження від фотогальванічного елемента.
3. Вимірювання напруги холостого ходу U_{oc} фотогальванічного елемента.
4. Розрахунок U_{mp} .
5. Зміна постійної напруги на виводах фотогальванічного елемента до досягнення U_{mp} .

У деяких випадках значення U_{mp} програмується зовнішнім резистором, під'єднаним до виводів керованого джерела струму. У цьому випадку резистор може бути частиною кола, яке містить термістор, тому значення може бути компенсовано за температурою.

При змінній освітленості метод забезпечує близько 80% доступної максимальної потужності. Фактична продуктивність визначатиметься середнім рівнем випромінювання. У разі низьких рівнів освітленості результати можуть бути кращими.

Метод холостого ходу за напругою схожий на метод постійної напруги, але покращений тим, що використовує U_{oc} для розрахунку U_{mp} . Після того, як система отримує значення U_{oc} , U_{mp} розраховується за виразом:

$$U_{mpp} = k \cdot U_{oc}, \quad (1.4)$$

де k – коефіцієнт, який знаходиться в межах від 0,7 до 0,8.

У методі холостого ходу необхідно періодично оновлювати U_{oc} для компенсації будь-якої зміни температури. Вибір значення U_{oc} може також допомогти виправити зміни температури та певною мірою зміни в освітленості.

Контроль вхідного струму може вказувати, коли необхідно повторно виміряти U_{oc} . Величина k є логарифмічною функцією освітленості, що збільшується зі зростанням інтенсивності випромінювання.

Переваги методу:

- 1) Відносно низька вартість.
- 2) Дуже простий та легкий у реалізації.

Недоліки методу:

- 1) Не точний і не може працювати рівно у точці максимальної потужності.
- 2) Повільний відгук U_{mp} у разі зміни U_{oc} .

Метод струму короткого замикання використовує значення I_{sc} для визначення I_{mp} у відповідності до виразу:

$$I_{mpp} = k \cdot I_{sc}, \quad (1.5)$$

де k – коефіцієнт, який знаходиться в межах від 0,9 до 0,98.

Метод струму короткого замикання використовує короткий імпульс опору для створення умов короткого замикання. Під час короткого замикання вхідна напруга обнулятиметься, тому схема перетворювача енергії повинна бути заживлена від будь-якого іншого джерела. Однією з переваг цієї системи є несприйнятливність вхідної ємності, порівняно з методом U_{oc} .

На рисунку 1.8 зображено вольт-амперну характеристику фотогальванічного елемента та графік потужності методу струму короткого замикання.

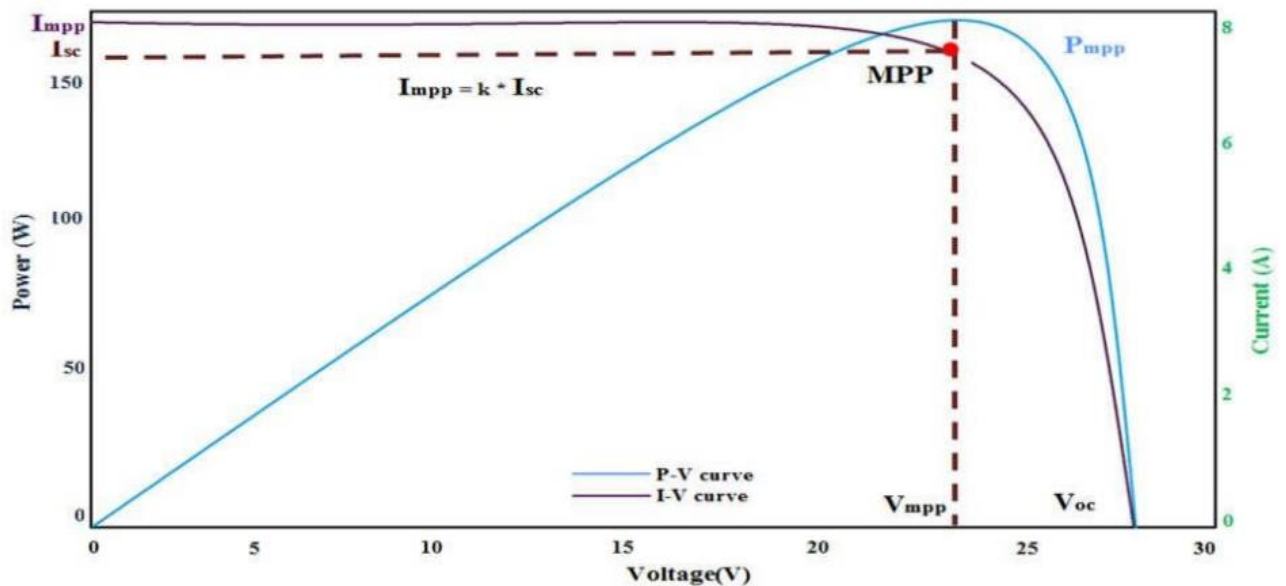


Рисунок 1.8 – Вольт-амперна характеристика фотогальванічного елемента та графік потужності методу струму короткого замикання

Переваги використання методу струму короткого замикання:

- простота та низька вартість реалізації;
- найкращий метод в умовах недостатньої інсоляції;

Недоліки методу струму короткого замикання:

- дані відрізняються залежно від розташування та погодних умов;
- метод має низьку ефективність.

У цих двох методах потрібно ретельно вибирати значення константи k , щоб точно відкалібрувати фотогальванічний елемент.

Метод приросту провідності.

Метод приросту провідності, базується на тому, що нахил кривої потужності фотогальванічного елемента (див. рисунок 1.4) дорівнює нулю в точці максимальної потужності у відповідності до виразу (1.6).

Нахил кривої потужності фотогальванічного елемента зліва від точки максимальної потужності є додатнім у відповідності до виразу (1.7), а нахил кривої потужності фотогальванічного елемента праворуч від точки максимальної потужності є від'ємним у відповідності до виразу (1.8).

$$\frac{\Delta I}{\Delta V} = -\frac{I}{V}; \quad (1.6)$$

$$\frac{\Delta I}{\Delta V} > -\frac{I}{V}; \quad (1.7)$$

$$\frac{\Delta I}{\Delta V} < -\frac{I}{V}; \quad (1.8)$$

де ΔI , ΔV – приріст струму та напруги;

I , V – струм та напруга фотогальванічного елемента в точці максимальної потужності.

У методі приросту провідності здійснюється вимірювання поточних значень напруги та струму фотогальванічного елемента. Далі обчислюються

прирости струму та напруги dI і dU , використовуючи поточні та попередні значення струму та напруги.

Основна перевірка виконується з використанням виразів (1.6) – (1.9). Якщо умова задовольняє виразу (1.7), то робоча точка знаходиться зліва від точки максимальної потужності. Звідси можна зробити висновок, що робочу точку потрібно перемістити вправо, збільшивши напругу фотогальванічного елемента.

Аналогічно, якщо умова задовольняє виразу (1.8), то робоча точка перебуває праворуч від точки максимальної потужності, тому її слід перемістити вліво, зменшуючи напругу модуля фотогальванічного елемента.

Якщо умова задовольняє виразу (1.6), то робоча точка досягає максимальної потужності і регулювання напруги не відбувається. Наприкінці циклу метод приросту провідності оновлює значення, зберігаючи дані напруги та струму, які будуть використовуватися як попередні значення у наступному циклі.

Переваги методу приросту провідності наступні.

1) Метод приросту провідності може визначити точки максимальної потужності без коливання навколо цього значення.

Недоліки методу приросту провідності наступні.

1) Метод приросту провідності може створювати коливання і нестабільно працювати в атмосферних умовах, які швидко змінюються.

2) Час обчислення збільшується через невелику частоту зчитування даних, обумовлену більш високою складністю алгоритму в порівнянні з методом збурення та спостереження.

Метод збурення та спостереження.

У методі збурення та спостереження контролер регулює напругу на фотогальванічному елементі на невелику величину і вимірює потужність. Якщо потужність зростає (рисунок 1.9), то напругу продовжують змінювати в цьому ж напрямку, до тих пір, поки потужність не перестане збільшуватися. Через

простоту реалізації метод збурення та спостереження найчастіше використовується для пошуку точки максимальної потужності.

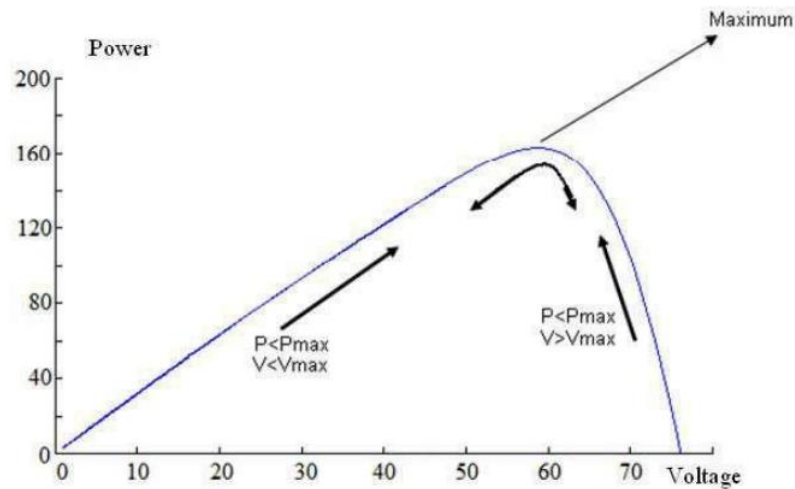


Рисунок 1.9 – Метод збурення та спостереження

Напруги фотогальванічного елемента спочатку збільшується. Якщо відбувається збільшення вихідної потужності, то напруга постійно збільшується, поки вихідна потужність не почне знижуватися. Після того, як вихідна потужність починає зменшуватися, напруга фотогальванічного елемента зменшується доти, доки не буде досягнута максимальна потужність. Процес продовжується до досягнення точки максимальної потужності. Результатом є коливання вихідної потужності навколо точки максимальної потужності.

Переваги використання методу збурення та спостереження:

- відносно проста реалізація;
- невелика вартість;
- відносно точний метод пошуку точки максимальної потужності.

Обмеження при використанні методу збурення та спостереження:

- алгоритм не може визначити, коли він фактично досяг точки максимальної потужності;
- вихідна потужність коливається навколо точки максимальної потужності;

- метод збурення та спостереження досить повільний, якщо напруга знаходиться далеко від точки максимальної потужності.

Висновки до першого розділу

1. На основі кремнію випускаються фотогальванічні елементи трьох типів: з полікристалів, монокристалів і на тонких плівках. У кожного з цих різновидів фотогальванічних елементів є свої робочі показники, особливості та сфери використання.

2. Фотогальванічний елемент є головним будівельним блоком фотоелектричної системи. Окрема комірка зазвичай досить маленька і виробляє потужність близько 1 або 2 Вт. Для збільшення вихідної потужності сонячних комірок вони повинні бути з'єднані разом, щоб сформувати більші секції, які називаються фотогальванічними модулями.

3. Використання еквівалентної електричної схеми заміщення фотогальванічного елемента дозволяє промоделювати характеристики фотогальванічного елемента. Модель фотогальванічного елемента складається із джерела фотоструму (I_{ph}), діода (D), паралельного опору (R_{sh}) та послідовного опору (R_s).

4. Вольт-амперні характеристики отримують шляхом опромінювання фотогальванічного елемента постійним рівнем світлового потоку, зберігаючи при цьому постійну температуру фотогальванічного елемента. Шляхом зміни опору навантаження, вимірюють струм. Вольт-амперні характеристики проходить через дві точки: струм короткого замикання (I_{CS}), коли виводи фотогальванічного елемента закорочені, а напруга між выводами дорівнює нулю. Це відповідає нульовому опору навантаження.

5. Для будь-якого заданого набору робочих умов фотогальванічний елемент має одну робочу точку, де значення струму (I) та напруги (U)

фотогальванічного елемента призводять до максимальної вихідної потужності. Ця точка отримала назву точки максимальної потужності.

6. Контролер точки максимальної потужності використовує перетворювач постійної напруги для регулювання напруги фотогальванічного елемента та встановлення цієї напруги в точку максимальної потужності, забезпечуючи узгодження навантаження максимальної передачі потужності.

7. Контролер фотогальванічного елемента - це електронний пристрій, що працює на базі чіпа, який контролює роботу системи та керує зарядом акумулятора. Контролер фотогальванічного елемента не допускає повного розрядження акумулятора та його зайвого заряду.

8. До основних методів відслідковування точки максимальної потужності відносяться: метод постійної напруги, метод холостого ходу за напругою, метод короткого замикання за струмом, метод приросту провідності та метод збурення і спостереження.

2. МЕТОД КЕРУВАННЯ ОПТИМІЗАТОРОМ СОНЯЧНОЇ ПАНЕЛІ

2.1 Особливості розрахунку паралельного та послідовного опору сонячної панелі

Особливістю запропонованого методу керування оптимізатором сонячної панелі є початковий розрахунок паралельного опору R_{sh} та послідовного опору R_s сонячної панелі, використовуючи параметри сонячної панелі, які надає виробник сонячної панелі.

До таких параметрів відносяться значення струму короткого замикання I_{SC} , напруги холостого ходу U_{OC} , струму в точці максимальної потужності I_{mp} та напруги в точці максимальної потужності U_{mp} .

Струм сонячної панелі описується виразом (2.1).

$$I = I_{ph} - I_s \left[\exp\left(\frac{V + IR_s}{mV_T}\right) - 1 \right] - \frac{V + IR_s}{R_{sh}}, \quad (2.1)$$

де $V_T = \frac{N_s kT}{q}$ – тепловий потенціал сонячної панелі, яка складається із N_s

послідовно з'єднаних фотогальванічних елементів;

m – діодний коефіцієнт ідеальності сонячної панелі, причому для полікристалічного кремнію $m=1,3$.

Перепишемо вираз струму сонячної панелі (2.1) у вигляді (2.2).

$$\exp\left(\frac{R_s}{mV_T} I + \frac{V}{mV_T}\right) = -\frac{R_{sh} + R_s}{I_0 R_{sh}} I + \frac{(I_{ph} + I_0)R_{sh} - V}{I_0 R_{sh}}. \quad (2.2)$$

Для спрощення виразу струму сонячної панелі (2.2) запишемо складові цього виразу у вигляді:

$$A = \frac{R_s}{mV_T}; \quad (2.3)$$

$$B = \frac{V}{mT_T}; \quad (2.4)$$

$$C = -\frac{R_{sh} + R_s}{I_0 R_{sh}}; \quad (2.5)$$

$$D = \frac{(I_{ph} + I_0)R_{sh} - V}{I_0 R_{sh}}. \quad (2.6)$$

З урахуванням введених позначень запишемо вираз струму сонячної панелі (2.2) у вигляді:

$$e^{AI+B} = CI + D. \quad (2.7)$$

Позначимо:

$$AI + AD / C = -t. \quad (2.8)$$

Тоді вираз струму сонячної панелі (2.7) у вигляді:

$$te^t = -\frac{A}{C} e^{B - \frac{AD}{C}} \quad (2.9)$$

W-функцією Ламберта називається обернена функція до функції $f(w) = we^w$ для комплексних змінної w . Тоді для комплексного числа z W-функцією Ламберта записується у вигляді функціонального рівняння:

$$z = W(z)e^{W(z)}. \quad (2.10)$$

W-функцією Ламберта приймає по два значення на інтервалі $[-1/e, 0]$. На рисунку 2.1 наведено графік W-функції Ламберта.

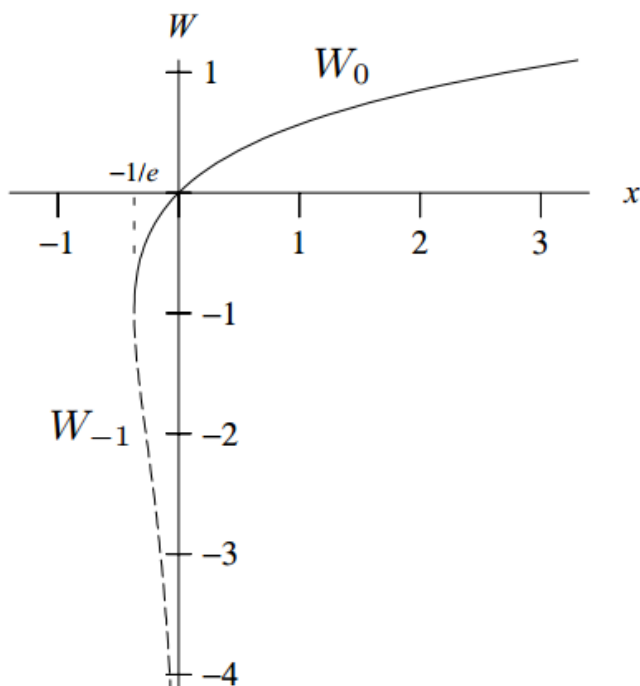


Рисунок 2.1 – Графік W-функції Ламберта

Якщо обмежитись лише дійсними числами для $z = x \geq -1/e$ і враховуючи умову, що $w \geq -1$, тоді W-функції Ламберта буде однозначною.

Похідна від W-функція Ламберта по змінній z визначається виразом:

$$\frac{dW(z)}{dz} = \frac{1}{z} \cdot \frac{W(z)}{W(z)+1}. \quad (2.11)$$

Застосуємо до виразу струму сонячної панелі (2.9) вираз W-функції Ламберта (2.10):

$$t = W\left(-\frac{A}{C} e^{B-\frac{AD}{C}}\right) \quad (2.12)$$

Після підстановки у вираз (2.12) початково введених позначень у відповідності до виразів (2.3)-(2.9), отримаємо вираз залежності струму сонячної панелі від її напруги (2.13):

$$I(V) = \frac{R_{sh}(I_{ph} + I_0) - V}{R_{sh} + R_s} - \frac{mV_T}{R_s} W \left(\frac{R_s R_{sh} I_0}{mV_T (R_{sh} + R_s)} \exp \left(\frac{R_{sh} R_s (I_{ph} + I_0) + R_{sh} V}{(R_{sh} + R_s) mV_T} \right) \right). \quad (2.13)$$

Аналогічно можна отримати вираз залежності напруги сонячної панелі від її струму (2.14):

$$V(I) = (I_{ph} + I_0 - I)R_{sh} - IR_s - mV_T W \left(\frac{I_0 R_{sh}}{mV_T} \exp \left(\frac{(I_{ph} + I_0 - I)R_{sh}}{mV_T} \right) \right). \quad (2.14)$$

Якщо перемножити вираз залежності струму сонячної панелі від її напруги (2.13) на вираз залежності напруги сонячної панелі від її струму (2.14), то отримаємо вираз залежності потужності сонячної панелі від її напруги $P = P(V)$.

Для спрощення запису виразу залежності потужності сонячної панелі від її напруги позначимо складові цього виразу наступним чином:

$$\frac{R_{sh}(I_{ph} + I_0)}{R_{sh} + R_s} = \Psi; \quad (2.15)$$

$$\frac{R_s R_{sh} I_0}{mV_T (R_{sh} + R_s)} \exp \left(\frac{R_{sh} R_s (I_{ph} + I_0)}{(R_{sh} + R_s) mV_T} \right) = \Theta; \quad (2.16)$$

$$\frac{R_{sh}}{(R_{sh} + R_s) mV_T} = \Phi. \quad (2.17)$$

Тоді вираз залежності потужності сонячної панелі від її напруги можна записати у вигляді (2.18):

$$P(V) = \Psi V - \frac{V^2}{R_{sh} + R_s} - \frac{mV_T}{R_s} V \cdot W(\Theta e^{\Phi V}). \quad (2.18)$$

Візьмо похідну по напрузі для виразу залежності потужності сонячної панелі від напруги (2.18). Тоді отримаємо вираз для похідної (2.19):

$$\frac{dP}{dV} = \Psi - \frac{2V}{R_{sh} + R_s} - \frac{mV_T}{R_s} \left[W(\Theta e^{\Phi V}) + \frac{\Phi V \cdot W(\Theta e^{\Phi V})}{W(\Theta e^{\Phi V}) + 1} \right] \quad (2.19)$$

Відомо, що в точці максимальної потужності сонячної панелі її похідна по напрузі дорівнює нулю.

$$\Psi - \frac{2V}{R_{sh} + R_s} - \frac{mV_T}{R_s} \left[W(\Theta e^{\Phi V}) + \frac{\Phi V \cdot W(\Theta e^{\Phi V})}{W(\Theta e^{\Phi V}) + 1} \right] = 0 \quad (2.20)$$

Звідси можна записати вирази для знаходження паралельного опору R_{sh} та послідовного опору R_s сонячної панелі, використовуючи параметри сонячної панелі, які надає виробник сонячної панелі.

Значення W-функції Ламберта, паралельного опору R_{sh} та послідовного опору R_s сонячної панелі можна розрахувати за допомогою програмного забезпечення Maple.

interface(imaginaryunit=j) :

$$I := V \rightarrow \frac{Rsh \cdot (Iph + I0)}{Rsh + Rs} - \frac{V}{Rsh + Rs} - \frac{m \cdot Vt}{Rs} \cdot \text{LambertW} \left(\frac{Rs \cdot Rsh \cdot I0}{m \cdot Vt \cdot (Rsh + Rs)} \right) \cdot \exp \left(\frac{Rsh \cdot Rs \cdot (Iph + I0) + Rsh \cdot V}{m \cdot Vt \cdot (Rsh + Rs)} \right);$$

$$I := V \mapsto \frac{Rsh (Iph + I0)}{Rsh + Rs} - \frac{V}{Rsh + Rs} - \frac{m Vt \text{ LambertW} \left(\frac{Rs Rsh I0 e^{\frac{Rs Rsh (Iph + I0) + Rsh V}{m Vt (Rsh + Rs)}}}{m Vt (Rsh + Rs)} \right)}{Rs}$$

$$V := I \rightarrow (Iph + I0 - I) \cdot Rsh - I \cdot Rs - m \cdot Vt \cdot \text{LambertW} \left(\frac{I0 \cdot Rsh}{m \cdot Vt} \right) \cdot \exp \left(\frac{(Iph + I0 - I) \cdot Rsh}{m \cdot Vt} \right);$$

$$V := I \mapsto (Iph + I0 - I) Rsh - I Rs - m Vt \text{ LambertW} \left(\frac{I0 Rsh e^{\frac{(Iph + I0 - I) Rsh}{m Vt}}}{m Vt} \right)$$

$$P := V \rightarrow V \cdot I(V);$$

$$P := V \mapsto VI(V)$$

$$f := V \rightarrow D(P)(V) = 0;$$

$$f := V \mapsto D(P)(V) = 0$$

$$I0 := \frac{Isc}{\exp \left(\frac{Voc}{m \cdot Vt} \right) - 1};$$

$$I0 := \frac{Isc}{e^{\frac{Voc}{m Vt}} - 1}$$

$$Vt := \frac{Ns \cdot k \cdot T}{q};$$

$$Vt := \frac{NskT}{q}$$

$$rsh := rs \rightarrow \frac{Vmp + Imp \cdot rs}{Iph - I0 \cdot \left(\exp \left(\frac{Vmp + Imp \cdot rs}{m \cdot Vt} \right) - 1 \right) - Imp};$$

$$rsh := rs \mapsto \frac{Imp rs + Vmp}{Iph - I0 \left(e^{\frac{Imp rs + Vmp}{m Vt}} - 1 \right) - Imp}$$

$$Rs0 := 0.001;$$

$$Rs0 := 0.001$$

$$Rsh0 := \frac{Vmp}{Isc - Imp} - \frac{Voc - Vmp}{Imp};$$

$$Rsh0 := \frac{Vmp}{Isc - Imp} - \frac{Voc - Vmp}{Imp}$$

2.2 Особливості методу керування оптимізатором сонячної панелі

Особливістю методу керування оптимізатором сонячної панелі є розрахунок струму в точці максимальної потужності I_{mp} та напруги в точці максимальної потужності U_{mp} , при вимірних значеннях інтенсивності сонячного випромінювання та температури сонячної панелі.

В якості оптимізатора сонячної панелі будемо використовувати перетворювач постійної напруги сонячної панелі у постійну напругу навантаження.

Оптимізатор сонячної панелі використовує перетворювач постійної напруги для регулювання вхідної напруги на сонячній панелі, а також забезпечення узгодження навантаження для максимальної передачі потужності від сонячної панелі до навантаження.

Вихідна напруга сонячної панелі може бути вищою або нижчою, ніж в точці максимальної потужності при певних значеннях інтенсивності сонячного випромінювання, температури та опору навантаження сонячної панелі.

Високоєфективний оптимізатор сонячної панелі використовує перетворення напруги постійного струму в низьку або вищу напругу за допомогою понижуючого-підвищуючого перетворювача.

Схема електрична принципова понижуючого перетворювача постійної напруги (рисунок 2.2) складається із польового транзистора VT1, діода Шоттки VD1, дроселя L1, конденсатора на вході C1 та конденсатора на виході C2. На затвор польового транзистора VT1 подається керуюча напруга у вигляді широтно-імпульсної модуляції.

В залежності від коефіцієнту заповнення керуючої напруги, можна регулювати величину сигналу на виході понижуючого перетворювача постійної напруги від $U_{вх}$ до 0.

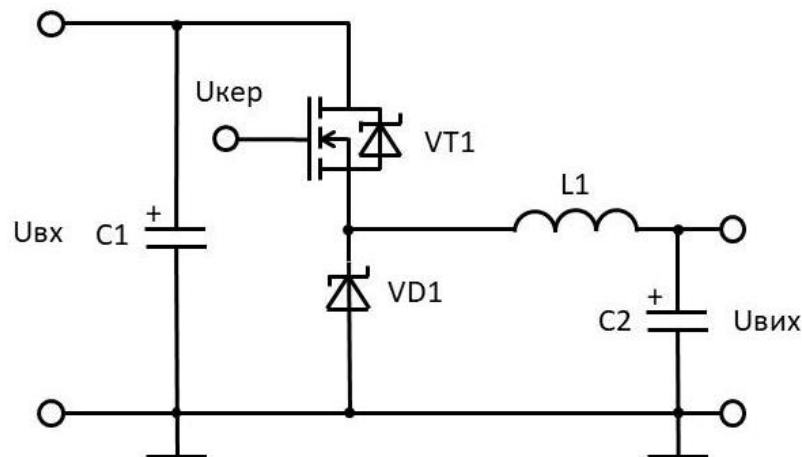


Рисунок 2.2 – Схема електрична принципова понижуючого перетворювача постійної напруги

Схема електрична принципова підвищуючого перетворювача постійної напруги зображена на рисунку 2.3.

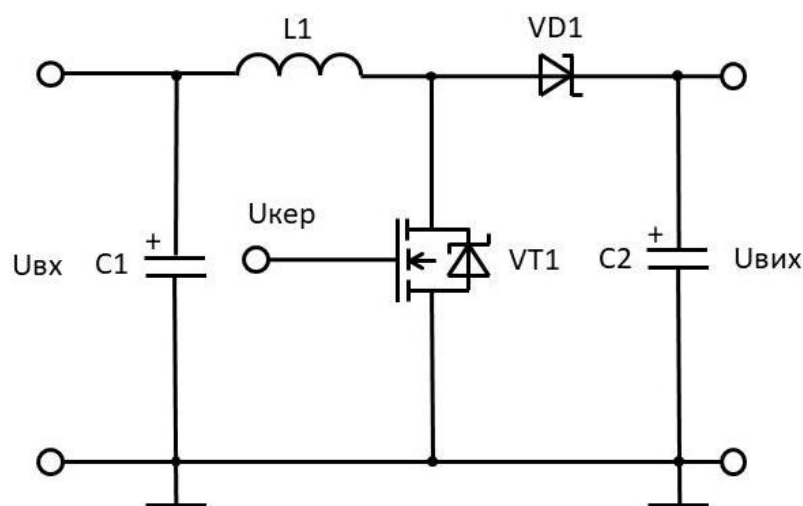


Рисунок 2.3 – Схема електрична принципова підвищуючого перетворювача постійної напруги

У цій схемі польовий транзистора VT1 та діод Шоттки VD1 поміняні місцями, а вхідна напруга подається на дросель L1. В залежності від коефіцієнту заповнення керуючої напруги, можна регулювати величину сигналу на виході підвищуючого перетворювача постійної напруги від $U_{вх}$ до $U_{мах}$.

Недоліком понижуючого та підвищуючого перетворювачів постійної напруги, які зображені на рисунку 2.2 та рисунку 2.3. відповідно, є втрати електричної енергії на відкритому діод Шоттки VD1. У відкритому стані на діоді Шоттки VD1 відбувається спад напруги біля 0,1 В. При протіканні великих струмів через діод Шоттки VD1 від 10 А і вище на ньому буде втрачатися потужність від 1 Вт і більше, що значно погіршує коефіцієнт корисної дії понижуючого та підвищуючого перетворювачів постійної напруги.

Зменшити втрати потужності електричної енергії та підвищити коефіцієнт корисної дії понижуючого та підвищуючого перетворювачів постійної напруги можна заміною діод Шоттки VD1 на польовий транзистор із малим опором каналу у відкритому стані.

Сучасні силові польові транзистори характеризуються опором каналу у відкритому стані на рівні від 4 мВ і менше, тому при проходженні через них струму від 10 А і вище на них буде втрачатися потужність від 0,04 Вт і менше. Це дозволяє значно підвищити коефіцієнт корисної дії понижуючого та підвищуючого перетворювачів постійної напруги.

Виористання замість діода Шоттки VD1 польового транзистора із малим опором каналу у відкритому стані дозволяє об'єднати схему електричну принципову понижуючого перетворювача постійної напруги (рисунок 2.2) із схемою електричною принциповою підвищуючого перетворювача постійної напруги (рисунок 2.3) в одну схему електричну принципову понижуючого-підвищуючого перетворювача постійної напруги, яка зображена на рисунку 2.4.

Схема електрична принципова понижуючого-підвищуючого перетворювача постійної напруги (рисунок 2.4) отримала назву Н-мостовий синхронний понижуючий-підвищуючий перетворювача постійної напруги.

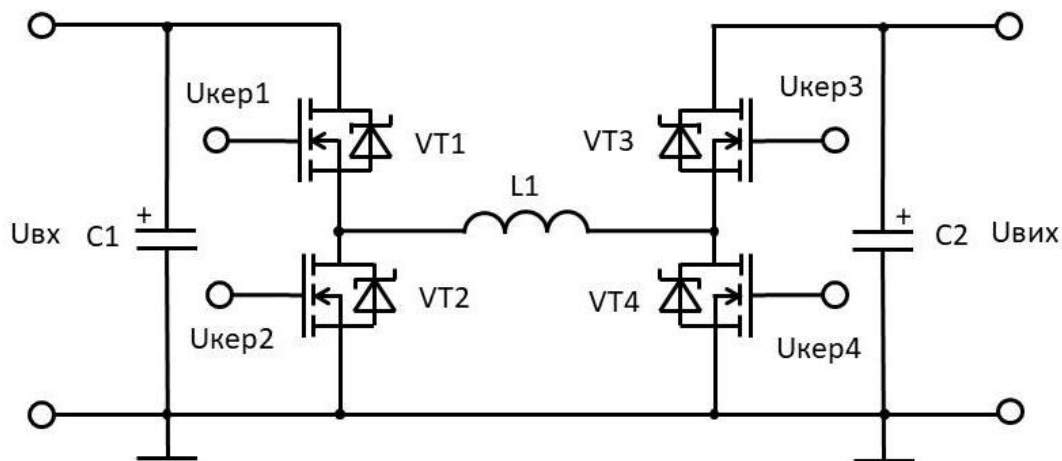


Рисунок 2.4 – Схема електрична принципова Н-мостового синхронного понижуючого-підвищуючого перетворювача постійної напруги

Особливістю Н-мостового синхронного понижуючого-підвищуючого перетворювача постійної напруги є те, що в понижуючому режимі польові транзистори VT1 та VT2 працюють із протифазними широтно-імпульсними модулюючими сигналами керування Uкер1 та Uкер2, які показані на рисунку 2.5.

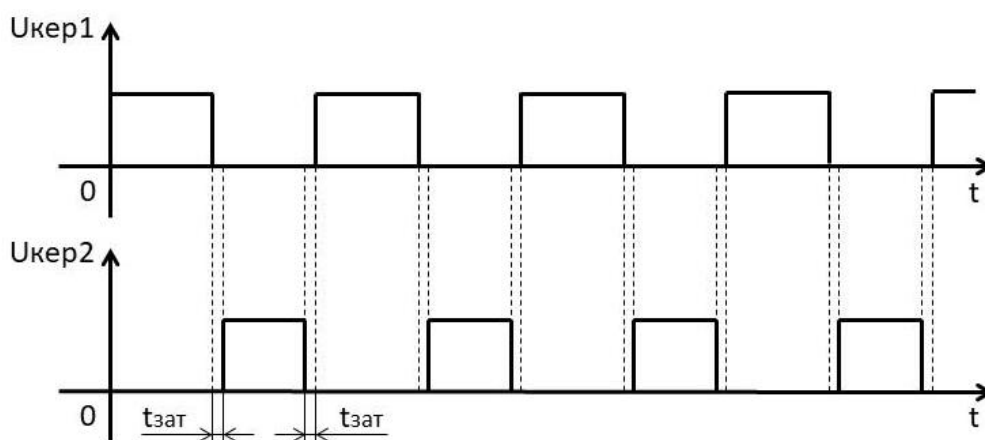


Рисунок 2.5 – Осцилограми сигналів керування Uкер1 та Uкер2

Аналіз осцилограм сигналів керування $U_{кер1}$ та $U_{кер2}$, які показані на рисунку 2.5 показує, що для запобігання одночасного відкривання обох польових транзисторів $VT1$ та $VT2$, необхідно забезпечити інтервал часової затримки $t_{зат}$, між закінченням імпульсу керування $U_{кер1}$ та початком імпульсу керування $U_{кер2}$.

Іншою особливістю Н-мостового синхронного понижуючого-підвищуючого перетворювача постійної напруги є те, що в понижуючому режимі польовий транзистор $VT3$ постійно відкритий, забезпечуючи проходження струму через дросель $L1$ на вихід перетворювача, а польовий транзистор $VT4$ – повинен бути постійно закритим для запобігання короткого замикання на виході перетворювача.

В процесі роботи Н-мостового синхронного понижуючого-підвищуючого перетворювача постійної напруги у підвищуючому режимі, польові транзистори $VT3$ та $VT4$ працюють із протифазними широтно-імпульсними модулюючими сигналами керування $U_{кер3}$ та $U_{кер4}$, які також повинні мати інтервал часової затримки $t_{зат}$, між закінченням імпульсу керування $U_{кер3}$ та початком імпульсу керування $U_{кер4}$. Це дозволить уникнути проходження наскрізного струму через обидва транзистори одночасно і виходу їх із ладу.

Особливістю Н-мостового синхронного понижуючого-підвищуючого перетворювача постійної напруги є те, що в підвищуючому режимі польовий транзистор $VT1$ постійно відкритий, забезпечуючи проходження вхідного струму через дросель $L1$ на вихід перетворювача, а польовий транзистор $VT2$ – повинен бути постійно закритим для запобігання короткого замикання на вході перетворювача.

Використання Н-мостового синхронного понижуючого-підвищуючого перетворювача постійної напруги в оптимізаторі сонячної панелі дозволить покращити його характеристики у порівнянні із оптимізаторами сонячних панелей, які використовують діоди Шоттки у своїх схемах керування.

2.3 Структурна схема оптимізатора сонячної панелі

Структурна схема оптимізатора сонячної панелі зображена на рисунку 2.6. До складу структурної схеми оптимізатора сонячної панелі входить датчик піранометр – датчик рівня освітленості сонячної панелі, датчик температури панелі, датчик струму, напруги та потужності сонячної панелі, а також Н-мостовий синхронний понижуючий-підвищуючий перетворювач постійної напруги і мікроконтролер.

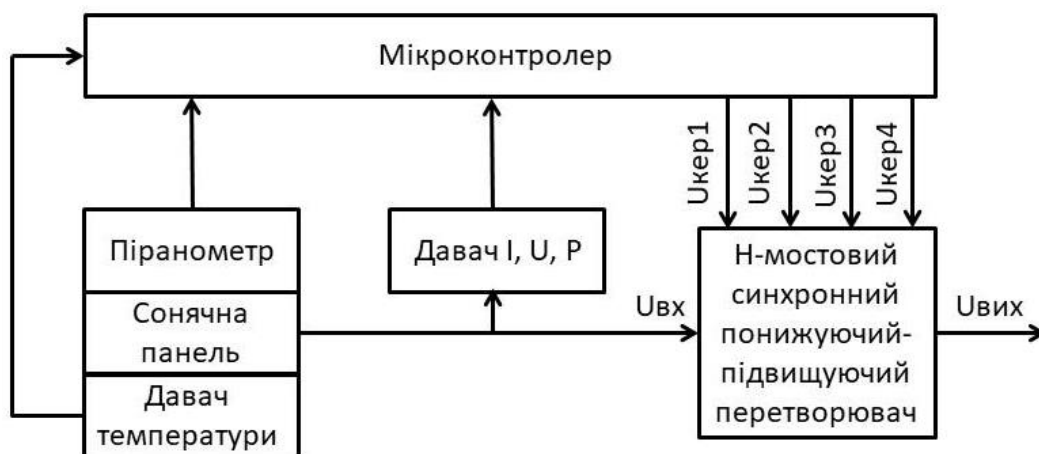


Рисунок 2.6 – Структурна схема оптимізатора сонячної панелі

Мікроконтролер отримує сигнали від датчиків рівня освітленості сонячної панелі, температури панелі, струму, напруги та потужності сонячної панелі. На основі отриманих даних мікроконтролер розраховує значення паралельного опору R_{sh} та послідовного опору R_s сонячної панелі, а також напругу в точці максимальної потужності U_{mpp} та струм в точці максимальної потужності I_{mpp} .

На основі отриманих даних про напругу в точці максимальної потужності U_{mpp} та струм в точці максимальної потужності I_{mpp} мікроконтролер розраховує параметри сигналів керування $U_{кер1}$, $U_{кер2}$, $U_{кер3}$ та $U_{кер4}$ та подає ці сигнали

на H-мостовий синхронний понижуючий-підвищуючий перетворювач постійної напруги.

Основний принцип запропонованого методу керування оптимізатором сонячної панелі полягає в тому, що похідна вихідної потужності відносно вихідної напруги повинна дорівнювати нулю в точці максимальної потужності за будь-яких умов опромінення або температури.

Точка максимальної потужності відстежується шляхом обчислення нахилу вольт-ватної характеристики сонячної панелі і це значення передається до мікроконтролера для керування H-мостовим синхронним понижуючо-підвищуючим перетворювачем постійної напруги.

Мікроконтролер обчислює значення нахилу вольт-ватної характеристики сонячної панелі та перевіряє, чи дорівнює нахил нулю. Нахил вольт-ватної характеристики сонячної панелі обчислюється за допомогою виразу:

$$\frac{dP}{dV} = \frac{P(n) - P(n-1)}{V(n) - V(n-1)} \quad (2.21)$$

Залежно від знака нахилу вольт-ватної характеристики сонячної панелі, коефіцієнт заповнення імпульсів H-мостового синхронного понижуючо-підвищуючого перетворювача постійної напруги або збільшується у разі додатного нахилу, або зменшується у випадку від'ємного нахилу для того, щоб досягти точки максимальної потужності сонячної панелі.

Контролер визначає помилку $e(s)$ від розрахунку dP/dV і формує вихідну сигнал керування $u(s)$ у вигляді коефіцієнта заповнення імпульсів H-мостового синхронного понижуючо-підвищуючого перетворювача постійної напруги. Такий контролер називається ПД-регулятором і реалізований у паралельній у відповідності до виразу:

$$U(s) = K_p e(s) + s^{-1} K_I e(s) + s^1 K_D e(s), \quad (2.22)$$

де K_p , K_I та K_D - коефіцієнти підсилення пропорційної, інтегральної та диференційної складової похибки ПД контролера.

Замінімо у виразі (2.22) інтеграл та похідну цілого порядку на інтеграл та похідну дробового порядку. Отримаємо ПД контролер дробового порядку, який описується виразом (2.23):

$$U(s) = K_p e(s) + s^{-\beta} K_I e(s) + s^\alpha K_D e(s), \quad (2.23)$$

де α і β – показники дробового порядку для інтегральної та диференційної складових ПД контролера дробового порядку.

Концепція дробового числення така ж стара, як і звичайне числення. З появою високошвидкісних і економічно ефективних обчислювальних потужностей тепер можна моделювати реальні проблеми керування й обробки сигналів за допомогою обчислення дробового порядку. За останні два десятиліття зросло застосування дробового числення в системному моделюванні, управлінні та обробці сигналів.

Існує кілька методів реалізації операторів дробового порядку; популярними є рекурсивна апроксимація Усталаупа для частотної області та визначення Грюнвальда-Летникова для часової області.

Ідея розробки контролера дробового порядку була запропонована Усталаупом для отримання кінцевої апроксимації систем дробового порядку в бажаному діапазоні частот, Усталауп запропонував алгоритм апроксимації в частотній області. З іншого боку, визначення Грюнвальда-Летникова операторів дробового порядку більше підходить для реалізації у часовій області на апаратному забезпеченні.

Тому в запропонованому методі керування оптимізатором сонячної панелі будемо використовувати визначання Грюнвальда-Летникова для реалізації операторів дробового порядку.

Використаємо спрощений математичний вираз для реалізації операторів дробового порядку для послідовності $x[n]$:

$$D^\gamma (x[n]) = T^{-\gamma} \sum_{j=0}^L b_j x[n-j], \quad (2.24)$$

де γ – бажана степінь дробового порядку, якою потрібно оперувати з заданою послідовністю $x[n]$;

L – необхідна довжина вікна;

b_j – відповідні біноміальні коефіцієнти, які потрібно обчислити для заданої дробової степені γ .

$$b_j = \left(1 - \frac{1+\gamma}{j}\right) b_{j-1}, \quad j = 1, 2, \dots \text{ та } b_0 = 1. \quad (2.25)$$

2.4 Регулювання оптимізатора сонячної панелі

Оптимальне функціонування ПІД контролера дробового порядку залежить від регулювання його коефіцієнти підсилення пропорційної K_p , інтегральної K_I та диференційної K_D складової похибки, а також показників дробового порядку α і β для інтегральної та диференційної складових відповідно.

Для регулювання оптимізатора сонячної панелі будемо використовувати метаевристичний підхід на основі еволюційного алгоритму. Метаевристичний підхід використовується в теорії стохастичної оптимізації, яка застосовується для пошуку оптимального (або досяжного оптимального) рішення.

Одним із прикладів використання метаевристичного підходу є алгоритм зворотного пошуку. Алгоритм зворотного пошуку використовує популяцію особин, яка покращується за допомогою еволюційних операторів, таких як Відбір I, мутація, схрещування та Відбір II.

Алгоритм зворотного пошуку також використовує концепцію історичної матриці, яка зберігає інформацію про попередні потенційні рішення та передає цю інформацію наступним поколінням, щоб пришвидшити процес конвергенції, а також підтримувати різноманітність серед індивідів.

Потрібно зазначити, що вибір алгоритм зворотного пошуку для регулювання оптимізатора сонячної панелі було зроблено після перевірки ефективності різних еволюційних методів, заснованих на інтелекті рою.

В процесі дослідження було встановлено, що алгоритм зворотного пошуку має високу продуктивність і дозволяє користувачеві вибирати значення змінних у широких межах, а не крайніх верхніх і нижніх межах, як у інших методах оптимізації.

Блок схема алгоритму зворотного пошуку зображена на рисунку 2.7. В процесі регулювання оптимізатора сонячної панелі використовується мінімальна інтегральна абсолютна похибки часу (МІАПЧ), яка описується виразом (2.26).

$$MIAПЧ = \sum_{n=1}^N \left| 0 - \frac{dP}{dV} \right| \cdot t \cdot T. \quad (2.26)$$

Значення верхньої та нижньої меж для регулювання коефіцієнтів підсилення пропорційної K_p , інтегральної K_I та диференційної K_D складових ПІД контролера наведені в таблиці 2.1. В процесі регулювання коефіцієнтів підсилення пропорційної K_p , інтегральної K_I та диференційної K_D складових ПІД контролера було задано розмір популяції 40, кількість поколінь 200 та коефіцієнт генерації $3 \cdot \text{randn}$ відповідно.

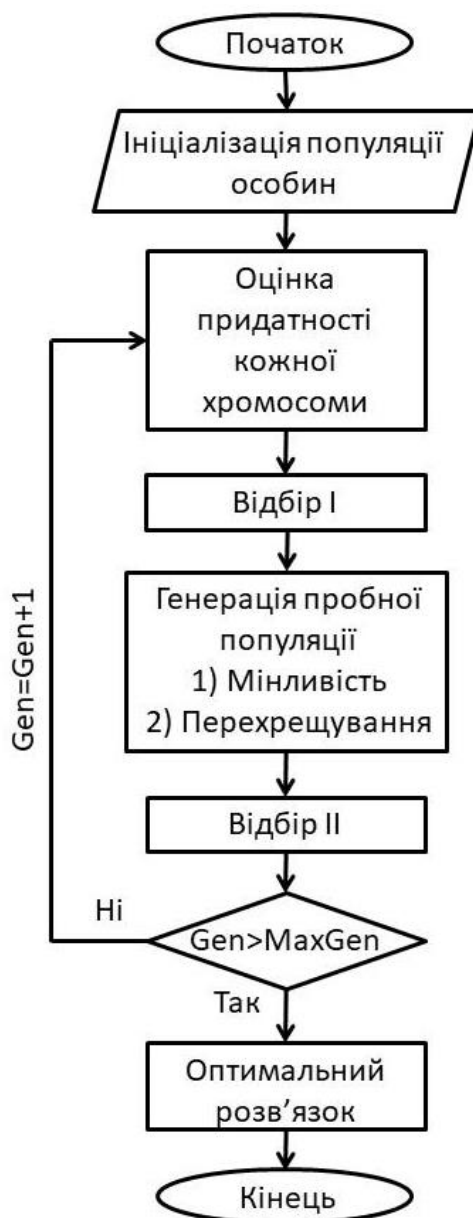


Рисунок 2.7 – Блок схема алгоритму зворотного пошуку

Таблиця 2.1 – Коефіцієнти ПД контролера

Коефіцієнти	Нижня межа	Верхня межа	Оптимальне значення
K_p	0,001	50	48,0657
K_I	0,001	50	30,9544
K_D	0,001	50	0,001

На початку роботи алгоритму зворотного пошуку відбувається ініціалізація випадковим набором популяції особин і певної кількості поколінь. Далі здійснюється оцінка придатності кожної особини, шляхом тестування різних наборів коефіцієнти ПД контролера, які були ініціалізовані.

Тестування проводилося у формі моделювання, коли значення коефіцієнтів підсилення пропорційної K_p , інтегральної K_I та диференційної K_D складових ПД контролера були вбудовані в фотоелектричну систему. Моделювання оптимізатора сонячної панелі здійснювалося протягом мінімального часу для досягнення усталеного стану.

Регулювання ПД контролера дробового порядку здійснювалося аналогічно до процесу регулювання ПД контролера. Єдина відмінність полягала в тому, що поряд з трьома параметрами коефіцієнтів підсилення пропорційної K_p , інтегральної K_I та диференційної K_D складових ПД контролера дробового порядку, також були налаштовані ще два додаткових параметри α і β . Значення верхньої та нижньої меж для регулювання коефіцієнтів підсилення пропорційної K_p , інтегральної K_I та диференційної K_D складових ПД контролера дробового порядку наведені в таблиці 2.2.

Таблиця 2.2 – Коефіцієнти ПД контролера дробового порядку

Коефіцієнти	Нижня межа	Верхня межа	Оптимальне значення
K_p	0,001	50	48,0657
K_I	0,001	50	30,9544
K_D	0,001	50	0,001
α	0,001	1	0,1523
β	0,001	1	0,7780

Оптимальне значення мінімальної інтегральної абсолютної похибки часу (МІАПЧ) наприкінці 200 ітерацій складає $1,0434 \times 10^{-5}$. Графіки мінімальної інтегральної абсолютної похибки часу протягом 200 ітерацій регуляторів ПІД контролера та ПІД контролера дробового порядку показані на рисунку 2.8.

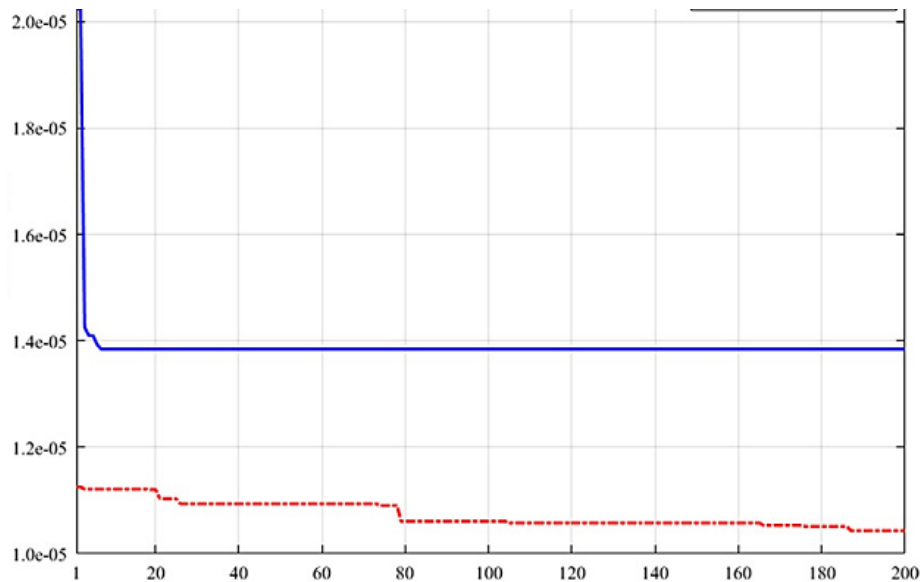


Рисунок 2.8 – Графіки мінімальної інтегральної абсолютної похибки часу протягом 200 ітерацій регуляторів ПІД контролера (синя крива) та ПІД контролера дробового порядку (червона крива)

Коефіцієнт ефективності роботи оптимізатора сонячної панелі описується виразом (2.27):

$$\eta = \frac{\int_0^T P(t) dt}{\int_0^T P_{\max}(t) dt}. \quad (2.27)$$

Коефіцієнт ефективності роботи оптимізатора сонячної панелі із ПІД контролером складає 98,71%, а коефіцієнт ефективності з ПІД контролером

дробового порядку складає 99,7%. Аналіз коефіцієнтів ефективності роботи оптимізатора сонячної панелі показує, що оптимізатор сонячної панелі з ПД контролером дробового порядку має вищий коефіцієнт ефективності роботи у порівнянні з оптимізатором сонячної панелі із ПД контролером.

Висновки до другого розділу

1. Особливістю запропонованого методу керування оптимізатором сонячної панелі є початковий розрахунок паралельного опору R_{sh} та послідовного опору R_s сонячної панелі, використовуючи параметри сонячної панелі, які надає виробник сонячної панелі.

2. Запропонований метод керування оптимізатором сонячної панелі базується на розрахунку струму в точці максимальної потужності I_{mp} та напруги в точці максимальної потужності U_{mp} при вимірних значеннях інтенсивності сонячного випромінювання та температури сонячної панелі.

3. До складу структурної схеми оптимізатора сонячної панелі входить давач піранометр – давач рівня освітленості сонячної панелі, давач температури панелі, давач струму, напруги та потужності сонячної панелі, а також H-мостовий синхронний понижуючий-підвищуючий перетворювач постійної напруги і мікроконтролер.

4. Основний принцип запропонованого методу керування оптимізатором сонячної панелі полягає в тому, що похідна вихідної потужності відносно вихідної напруги повинна дорівнювати нулю в точці максимальної потужності за будь-яких умов опромінення або температури.

5. Точка максимальної потужності відстежується шляхом обчислення нахилу вольт-ватної характеристики сонячної панелі і це значення передається до мікроконтролера для керування H-мостовим синхронним понижуючо-підвищуючим перетворювачем постійної напруги.

6. Для регулювання оптимізатора сонячної панелі будемо використовувати метаевристичний підхід на основі еволюційного алгоритму. Метаевристичний підхід використовується в теорії стохастичної оптимізації, яка застосовується для пошуку оптимального (або досяжного оптимального) рішення.

7. В процесі дослідження було встановлено, що алгоритм зворотного пошуку має високу продуктивність і дозволяє користувачеві вибирати значення змінних у широких межах, а не крайніх верхніх і нижніх межах, як у інших методах оптимізації.

8. Коефіцієнт ефективності роботи оптимізатора сонячної панелі із ПД контролером складає 98,71%, а коефіцієнт ефективності з ПД контролером дробового порядку складає 99,7%. Аналіз коефіцієнтів ефективності роботи оптимізатора сонячної панелі показує, що оптимізатор сонячної панелі з ПД контролером дробового порядку має вищий коефіцієнт ефективності роботи у порівнянні з оптимізатором сонячної панелі із ПД контролером.

3 ІМІТАЦІЙНА МОДЕЛЬ ОПТИМІЗАТОРА СОНЯЧНОЇ ПАНЕЛІ

3.1 Імітаційна модель сонячної панелі

Виконаємо імітаційне моделювання для сонячної панелі CL-P72295 китайської компанії ABISOLAR. Сонячна панелі CL-P72295 зображена на рисунку 3.1.



Рисунок 3.1 – Сонячна панель CL-P72295 китайської компанії ABISOLAR

Сонячна панель CL-P72295 китайської компанії ABISOLAR характеризується високою продуктивністю, що дозволяє її використовувати панель при розсіяному світлі. Сонячна панель CL-P72295 китайської компанії ABISOLAR забезпечує підвищене вироблення електричної енергії при похмурий погоді та в зимовий час.

Підвищений ККД сонячної панелі обумовлений використанням загартованого скла високої якості, яке характеризується високою прозорістю. Для запобігання деформації сонячної панелі використовується високоякісний

анодований алюмінієвий профіль з дренажними отворами та жорсткою конструкцією.

Основні параметри сонячної панелі CL-P72295 китайської компанії ABISOLAR наведені в таблиці 3.1.

Таблиця 3.1 - Основні параметри сонячної панелі CL-P72295

Параметр	Значення
модель	CL-P72295
тип	полікристалічний
кількість комірок	72
потужність в ТМП $P_{тмп}$ (Вт)	295
напруга в ТМП $U_{тмп}$ (В)	36,5
струм в ТМП $I_{тмп}$ (А)	8,08
напруга в режимі холостого ходу $U_{хх}$ (В)	43,3
струм в режимі короткого замикання $I_{кз}$ (А)	8,64
ККД (%)	15,23
температурний коефіцієнт напруги $U_{хх}$ (%/°C)	-0,34
температурний коефіцієнт струму $I_{кз}$ (%/°C)	0,06
температурний коефіцієнт потужності $P_{тмп}$ (%/°C)	-0,44
розміри (мм)	1956x990x50
вага (кг)	24
робоча температура (°C)	- 45 °C + 85 °C
термін експлуатації (80 % потужності після 20 років експлуатації)	20

У специфікаціях виробників відсутні кілька параметрів, обов'язкових для моделювання сонячної панелі CL-P72295, а саме струм насичення діода, фотострум, коефіцієнт ідеальності діода та послідовний і паралельний опори.

Компанія Mathworks у додатку Simulink надає бібліотеку Simscape/Electrical/Specialized Power Systems/Sources модель PV Array, яка дозволяє розрахувати струм насичення діода, фотострум, коефіцієнт ідеальності діода, послідовний та паралельний опори сонячної панелі і зображена на рисунку 3.2.

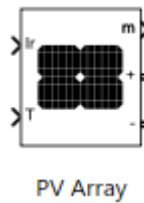


Рисунок 3.2 – Модель PV Array із бібліотеки Simscape/Electrical/Specialized Power Systems/Sources додатку Simulink компанії Mathworks

До складу моделі PV Array входить масив фотоелектричних модулів, що складається із рядків модулів, які з'єднані паралельно. Кожний рядок складається із модулів, які з'єднані послідовно.

В процесі моделювання за допомогою PV Array можна використовувати сонячні панелі із бази даних додатку System Advisor. Додаток System Advisor розроблений Національною лабораторією відновлюваної енергетики (NREL), США. Також є можливість моделювати інші сонячні панелі, які не входять до складу бази даних додатку System Advisor.

У моделі PV Array використовується п'яти-параметрична еквівалентна схема заміщення сонячної панелі, яка складається із джерело фотоструму, діоду, послідовного та паралельного опорів сонячної панелі.

Для моделювання сонячних панелей, які не входять до складу бази даних додатку System Advisor, використовується інтерфейс користувача для встановлення параметрів сонячної панелі згідно паспортних даних.

Сонячна панель CL-P72295 китайської компанії ABISOLAR не входить до складу бази даних додатку System Advisor, тому задамо її параметри із таблиці 3.1 у відповідності до рисунку 3.3.

Allows modeling of a variety of preset PV modules available from NREL System Advisor Model (Jan. 2014) as well as user-defined PV module.
Input 1 = Sun irradiance, in W/m2, and input 2 = Cell temperature, in deg.C.

Parameters Advanced

Array data

Parallel strings

Series-connected modules per string

Module data

Module:

Maximum Power (W)

Cells per module (Ncell)

Open circuit voltage Voc (V)

Short-circuit current Isc (A)

Voltage at maximum power point Vmp (V)

Current at maximum power point Imp (A)

Temperature coefficient of Voc (%/deg.C)

Temperature coefficient of Isc (%/deg.C)

Display I-V and P-V characteristics of ...

Irradiances (W/m2)

Model parameters

Light-generated current IL (A)

Diode saturation current I0 (A)

Diode ideality factor

Shunt resistance Rsh (ohms)

Series resistance Rs (ohms)

Рисунок 3.3 – Інтерфейс користувача моделі PV Array із встановленими параметрами сонячної панелі CL-P72295 китайської компанії ABISOLAR при температурі $T=25^{\circ}\text{C}$

В результаті моделювання отримали наступні параметри еквівалентної схеми заміщення сонячної панелі CL-P72295 китайської компанії ABISOLAR.

1. Величина фотоструму $I_L=8,6588$ А.
2. Струм насичення діода $I_0=1,4258 \cdot 10^{-10}$ А.
3. Коефіцієнт ідеальності діода $m=0,9437$.
4. Паралельний опір сонячної панелі $R_{sh}=195,9636$ Ом.
5. Послідовний опір сонячної панелі $R_s=0,17931$ Ом.

Натиснувши кнопку Plot побудуємо вольт-амперні та вольт-ватні характеристики сонячної панелі CL-P72295 китайської компанії ABISOLAR при температурі $T=25^\circ\text{C}$, які зображені на рисунку 3.4.

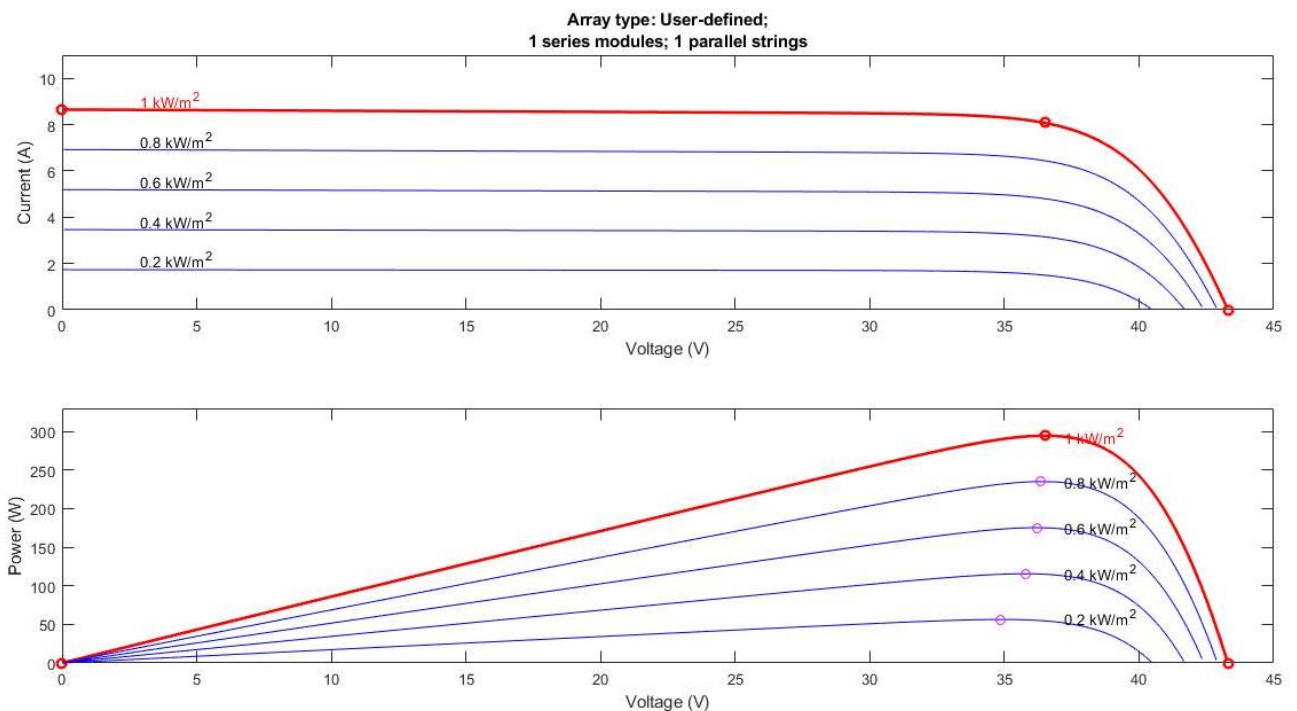


Рисунок 3.4 – Вольт-амперні та вольт-ватні характеристики сонячної панелі CL-P72295 китайської компанії ABISOLAR при температурі $T=25^\circ\text{C}$

Вольт-амперні та вольт-ватні характеристики сонячної панелі CL-P72295 китайської компанії ABISOLAR, які зображені на рисунку 3.4, отримані для п'яти заданих рівнів випромінювання світла $G_1=1000 \text{ Вт/м}^2$, $G_2=800 \text{ Вт/м}^2$, $G_3=600 \text{ Вт/м}^2$, $G_4=400 \text{ Вт/м}^2$ і $G_5=200 \text{ Вт/м}^2$ при температурі $T=25^\circ\text{C}$.

Для побудови вольт-амперних та вольт-ватних характеристик сонячної панелі CL-P72295 китайської компанії ABISOLAR при тестовому рівні випромінювання світла $G=1000 \text{ Вт/м}^2$ для діапазону температур від $T_{\min}=-20^\circ\text{C}$ до $T_{\max}=60^\circ\text{C}$, задамо п'ять рівнів температур $T_1=0^\circ\text{C}$, $T_2=20^\circ\text{C}$, $T_3=40^\circ\text{C}$, $T_4=60^\circ\text{C}$ і $T_5=80^\circ\text{C}$, у відповідності до рисунку 3.5.

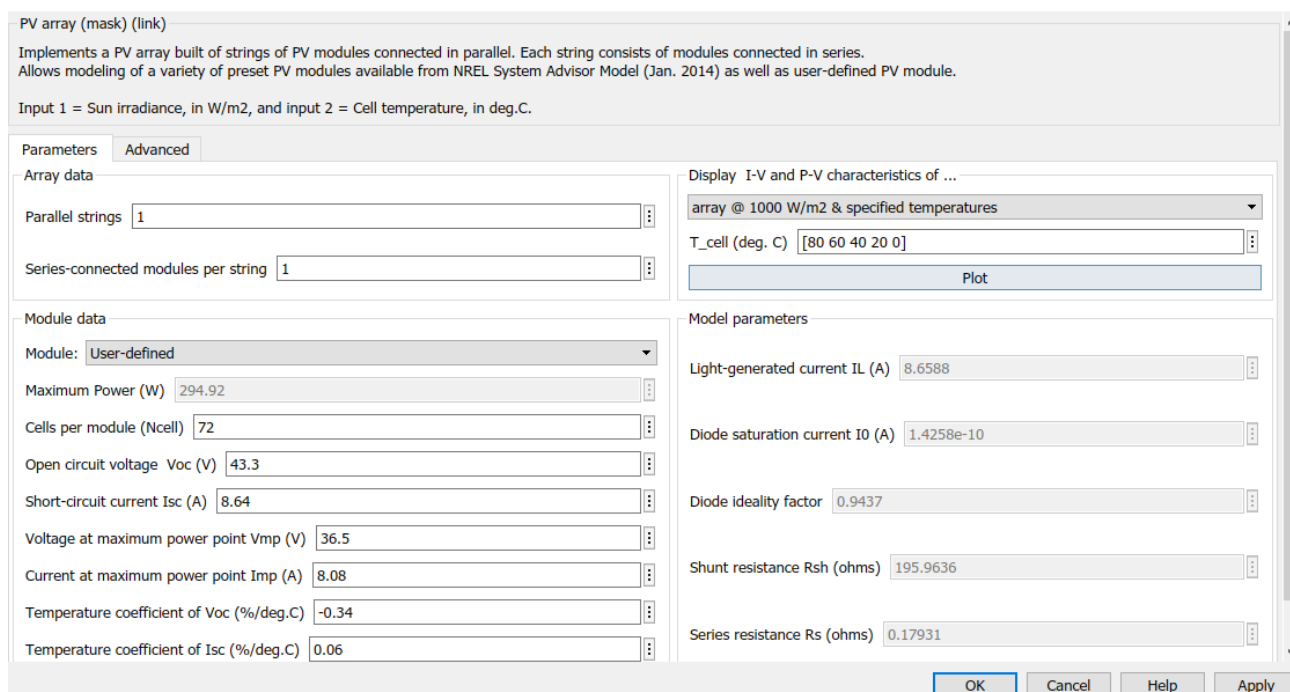


Рисунок 3.5 – Інтерфейс користувача моделі PV Array із встановленими параметрами сонячної панелі CL-P72295 китайської компанії ABISOLAR при рівні випромінювання світла $G=1000 \text{ Вт/м}^2$

Натиснувши кнопку Plot побудуємо вольт-амперні та вольт-ватні характеристики сонячної панелі CL-P72295 китайської компанії ABISOLAR при рівні випромінювання світла $G=1000 \text{ Вт/м}^2$ для п'яти рівнів температур $T_1=0^\circ\text{C}$, $T_2=20^\circ\text{C}$, $T_3=40^\circ\text{C}$, $T_4=60^\circ\text{C}$ і $T_5=80^\circ\text{C}$, які зображені на рисунку 3.6.

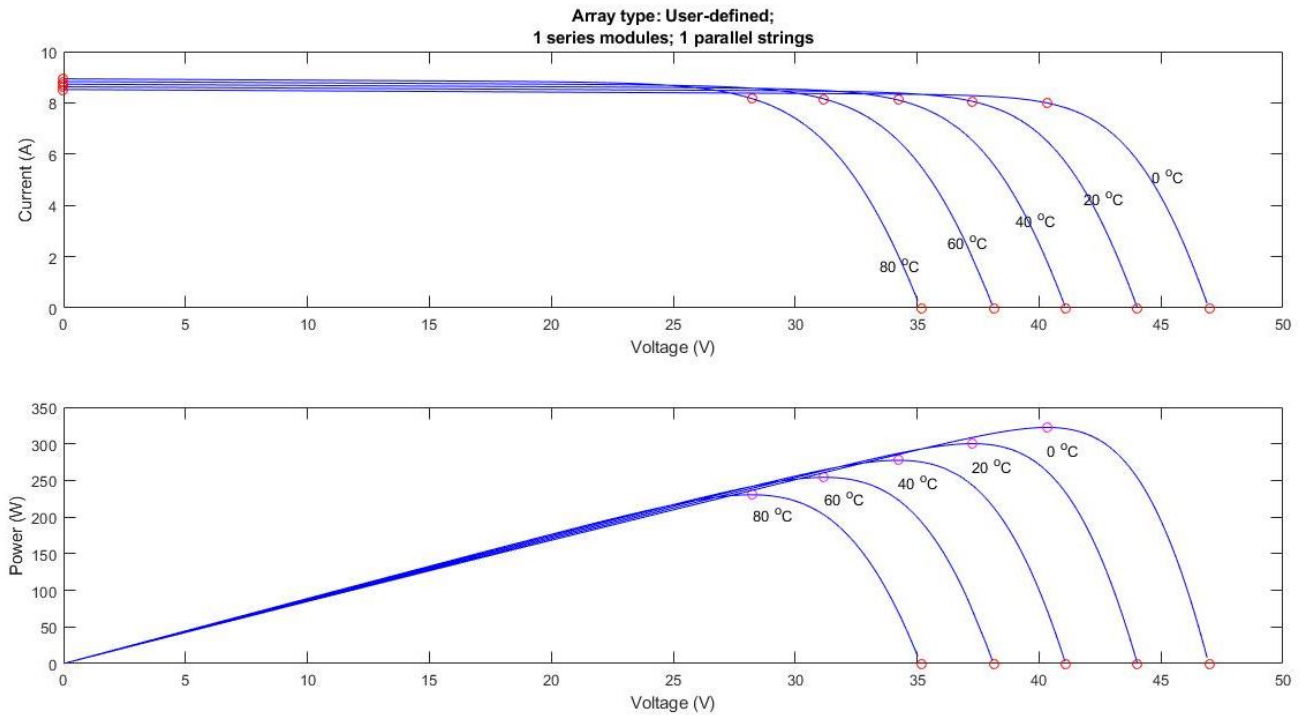


Рисунок 3.6 – Вольт-амперні та вольт-ватні характеристики сонячної панелі CL-P72295 китайської компанії ABISOLAR рівні випромінювання світла $G=1000 \text{ Вт/м}^2$ для п'яти рівнів температур $T_1=0^\circ\text{C}$, $T_2=20^\circ\text{C}$, $T_3=40^\circ\text{C}$, $T_4=60^\circ\text{C}$ і $T_5=80^\circ\text{C}$

Аналіз вольт-амперних та вольт-ватних характеристик сонячної панелі CL-P72295 китайської компанії ABISOLAR при різних рівнях випромінювання

світла та зміні температури показує, що точка максимальної потужності сонячної панелі суттєво залежить від цих величин.

Для дослідження впливу часткового затемнення сонячної панелі на роботу іншої сонячної панелі, яка увімкнена із нею послідовно, виконаємо імітаційне моделювання роботи послідовного з'єднання двох сонячних панелей CL-P72295 китайської компанії ABISOLAR. Нехай одна із двох послідовно з'єднаних сонячних панелей працює із рівнем випромінювання світла $G_1=1000$ Вт/м², для іншої рівень випромінювання світла складає $G_2=500$ Вт/м².

Імітаційна модель двох послідовно з'єднаних сонячних панелей із різними рівнями випромінювання світла $G_1=1000$ Вт/м² та $G_2=500$ Вт/м² у програмному забезпеченні Simulink, зображена на рисунку 3.7.

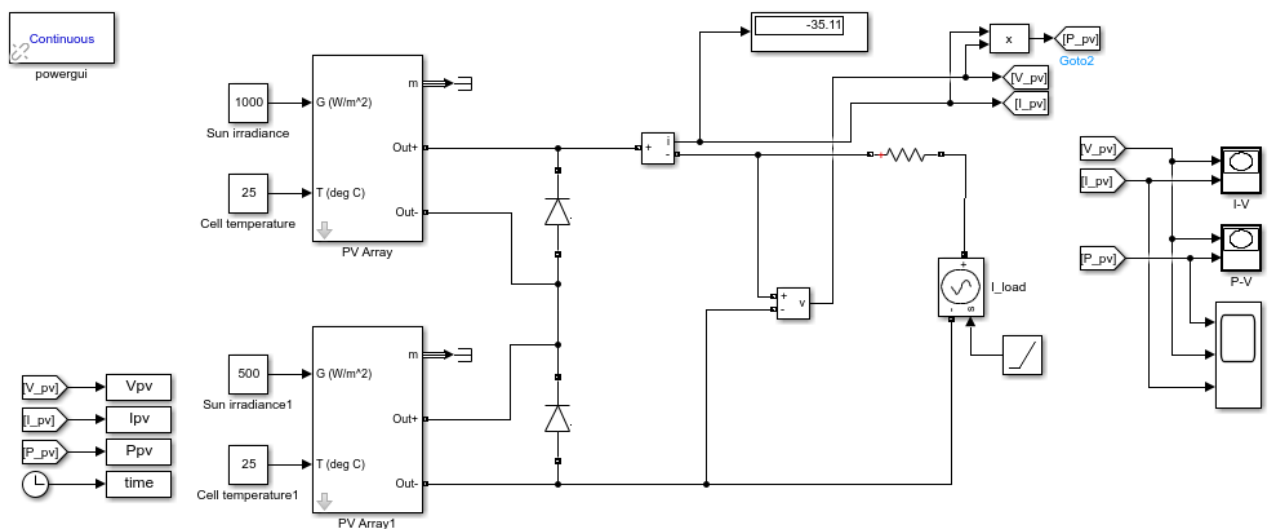


Рисунок 3.7 – Імітаційна модель двох послідовно з'єднаних сонячних панелей із різними рівнями випромінювання світла $G_1=1000$ Вт/м² та $G_2=500$ Вт/м²

В результаті імітаційного моделювання отримана вольт-амперна характеристика двох послідовно з'єднаних сонячних панелей CL-P72295 китайської компанії ABISOLAR із різними рівнями випромінювання світла $G_1=1000 \text{ Вт/м}^2$ та $G_2=500 \text{ Вт/м}^2$, яка зображена на рисунку 3.8.

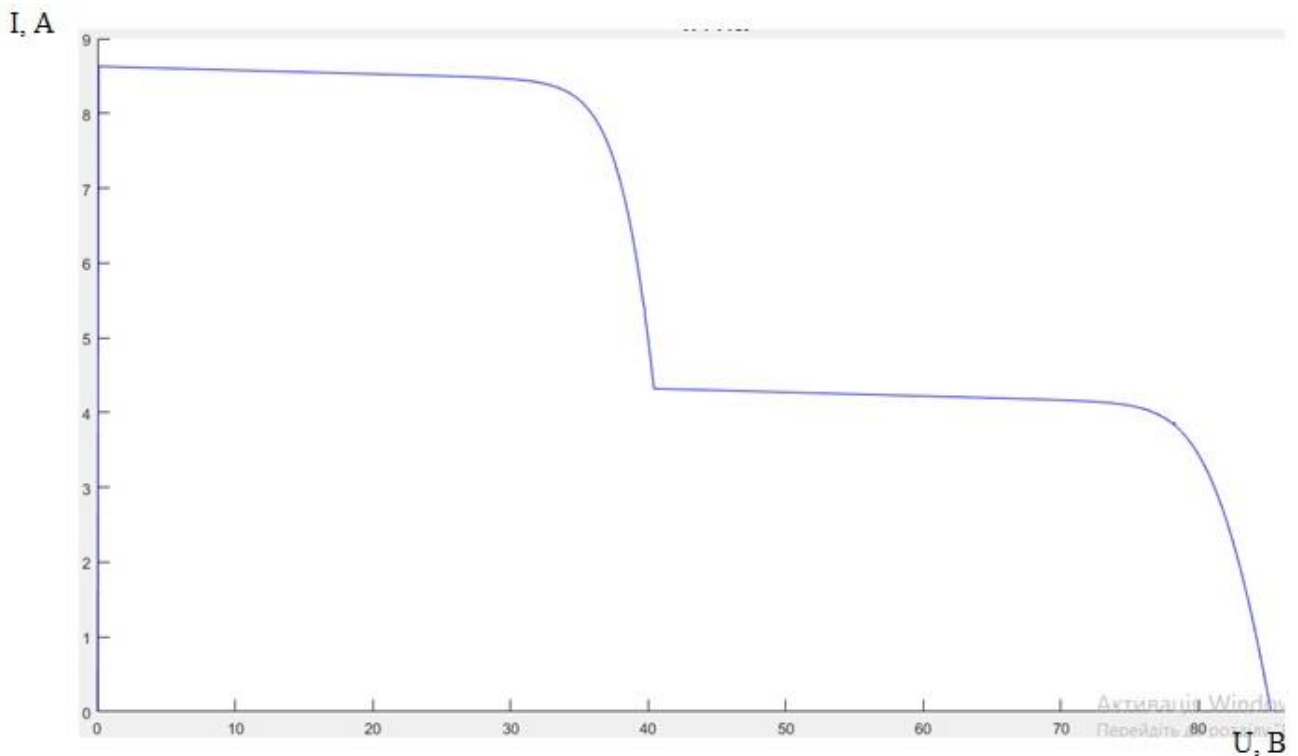


Рисунок 3.8 – Вольт-амперна характеристика двох послідовно з'єднаних сонячних панелей CL-P72295 китайської компанії ABISOLAR із різними рівнями випромінювання світла $G_1=1000 \text{ Вт/м}^2$ та $G_2=500 \text{ Вт/м}^2$

На рисунку 3.9 зображена вольт-ватна характеристика двох послідовно з'єднаних сонячних панелей CL-P72295 китайської компанії ABISOLAR із різними рівнями випромінювання світла $G_1=1000 \text{ Вт/м}^2$ та $G_2=500 \text{ Вт/м}^2$.

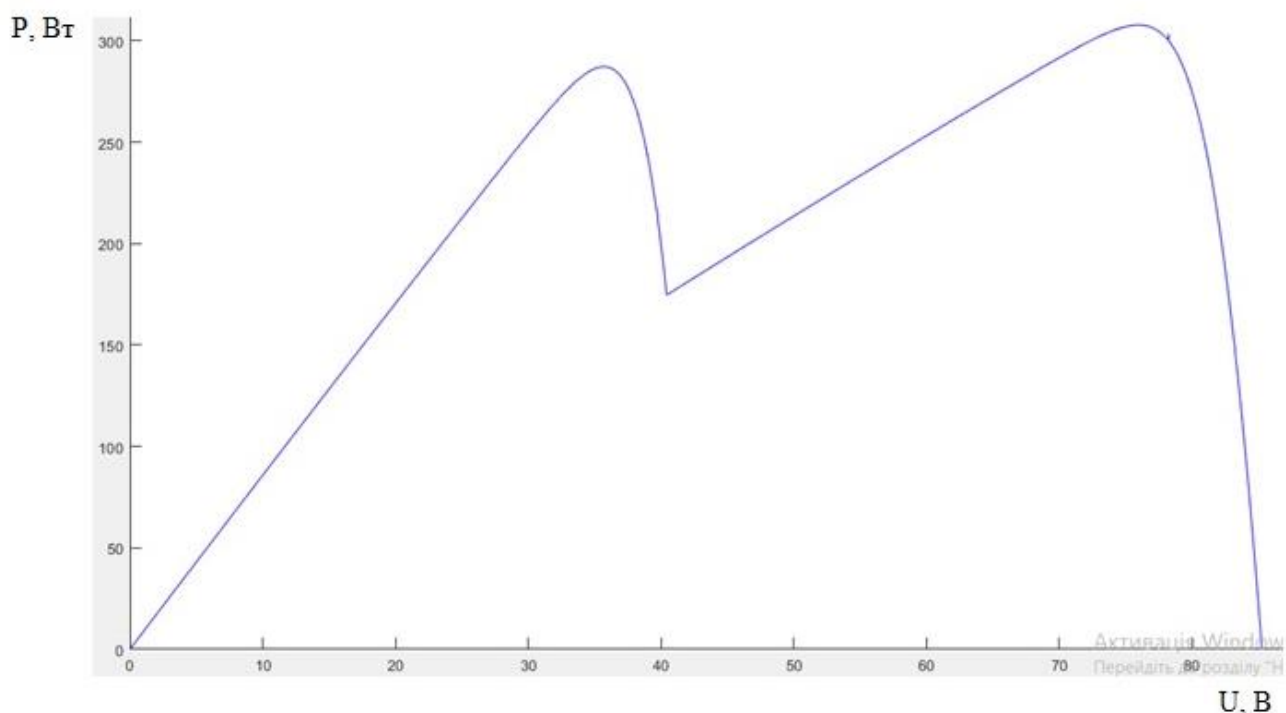


Рисунок 3.9 – Вольт-ватна характеристика двох послідовно з'єднаних сонячних панелей CL-P72295 китайської компанії ABISOLAR із різними рівнями випромінювання світла $G_1=1000 \text{ Вт/м}^2$ та $G_2=500 \text{ Вт/м}^2$

Аналіз вольт-амперних та вольт-ватних характеристик двох послідовно з'єднаних сонячних панелей CL-P72295 китайської компанії ABISOLAR із різними рівнями випромінювання світла, які зображені на рисунках 3.8 та 3.9 відповідно, показує, що струм досягає максимального значення 8,5 А лише в діапазоні напруги від 0 В до 36,5 В. Такий струм відповідає рівню випромінювання світла $G_1=1000 \text{ Вт/м}^2$ першої панелі.

При зміні збільшенні напруги від 36,5 В і до 80 В струм зменшується до значення 4,2 А, що відповідає струму другої панелі із рівнем випромінювання світла $G_2=500 \text{ Вт/м}^2$.

Наслідком такого обмеження струму при напругах від 36,5 В і до 80 В є наявність двох максимумів потужності на вольт-ватній характеристиці двох послідовно з'єднаних сонячних панелей CL-P72295 китайської компанії ABISOLAR із різними рівнями випромінювання світла, яка зображені на рисунках 3.9.

Звідси можна зробити висновок, що якщо використовувати один оптимізатор потужності для одразу двох сонячних панелей, то він знайде або перший, або другий максимум потужності. Ці максимуми потужності є локальними і не дозволяють отримати максимальну потужність одразу двох сонячних панелей одночасно.

Якщо кожену панель під'єднати до окремого оптимізатора потужності, то тоді кожна панель буде працювати у своїй точці максимальної потужності, що значно підвищить ефективність роботи одразу двох послідовно з'єднаних сонячних панелей CL-P72295 китайської компанії ABISOLAR.

3.2 Імітаційна модель оптимізатора сонячної панелі

Для виконання імітаційного моделювання оптимізатора сонячної панелі була розроблена імітаційна модель в середовищі Simulink, яка зображена на рисунку 3.10.

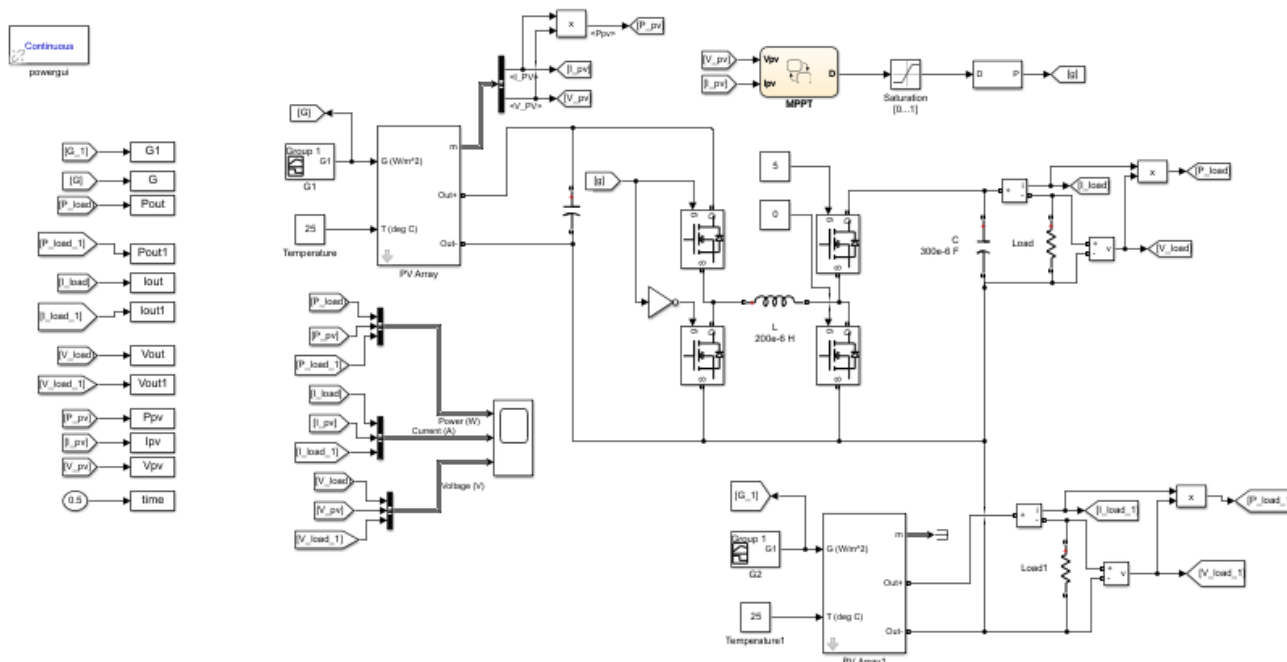


Рисунок 3.10 – Імітаційна модель оптимізатора сонячної панелі

До складу імітаційної моделі оптимізатора сонячної панелі ходять дві імітаційних моделі сонячної панелі CL-P72295 китайської компанії ABISOLAR, яка зображена на рисунку 3.11.

На вхід імітаційної моделі оптимізатора сонячної панелі ходять дві імітаційних моделі сонячної панелі CL-P72295 китайської компанії ABISOLAR подається змінний у часі рівень випромінювання світла $G1$, графік якого зображений на рисунку 3.12.

На початку імітаційного моделювання застосовується рівень випромінювання світла $G1=400 \text{ Вт/м}^2$, потім рівень випромінювання світла збільшується до $G1=1000 \text{ Вт/м}^2$, а на завершальному етапі застосовується рівень випромінювання світла $G1=200 \text{ Вт/м}^2$.

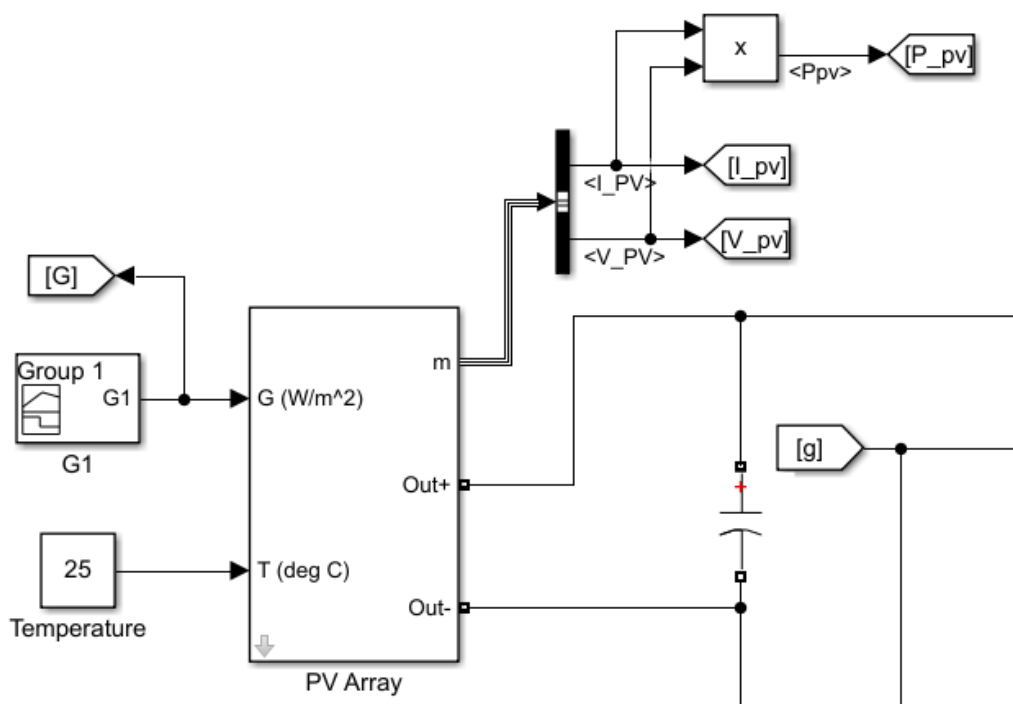


Рисунок 3.11 – Імітаційна модель сонячної панелі

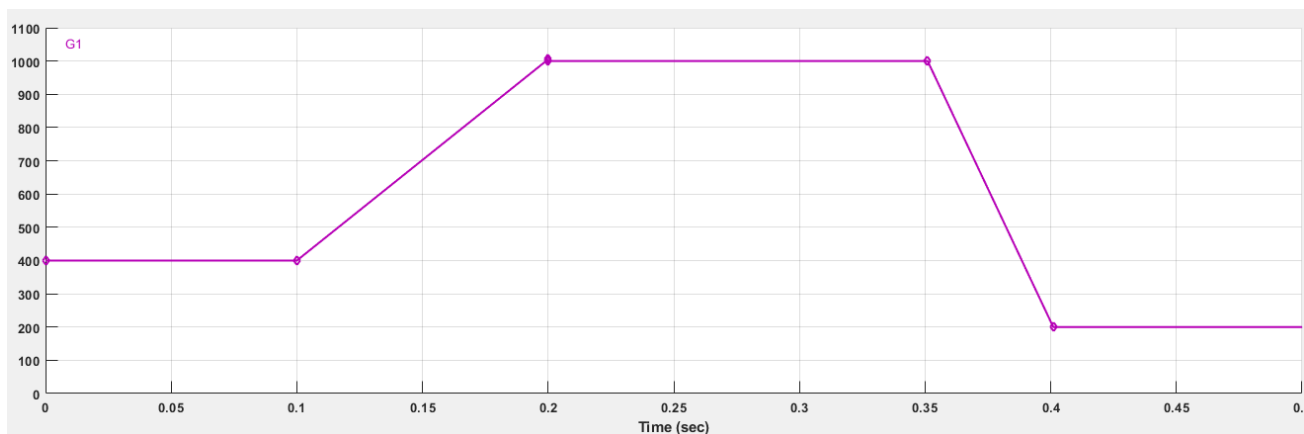


Рисунок 3.12 – Змінний у часі рівень випромінювання світла G1

До виходу першої сонячної панелі приєднано оптимізатор сонячної панелі, побудований за схемою Н-мостового синхронного понижуючого-підвищуючого перетворювача постійної напруги і зображений на рисунку 3.13.

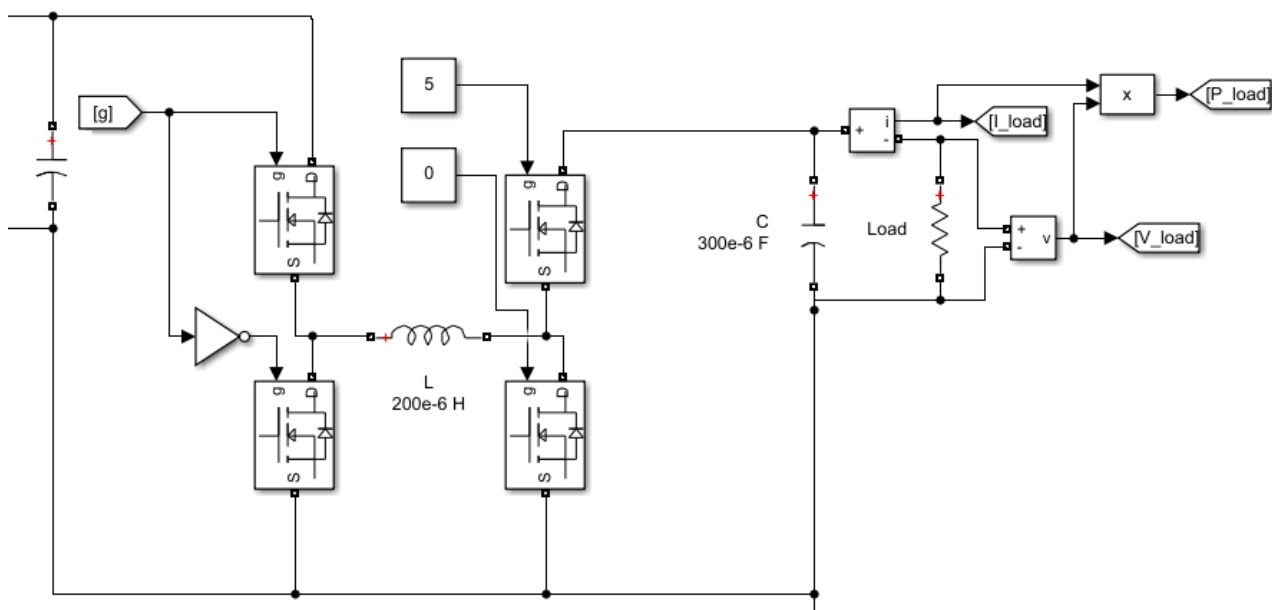


Рисунок 3.13 – Імітаційна модель Н-мостового синхронного понижуючого-підвищуючого перетворювача постійної напруги

Керування Н-мостовим синхронним понижуючого-підвищуючим перетворювачем постійної напруги здійснюється за допомогою імітаційної моделі блоку пошуку точки максимальної потужності (MPPT), який керує генератором широтно-імпульсного сигналу та виробляє сигнал керування польовими транзисторами g , що зображений на рисунку 3.14.

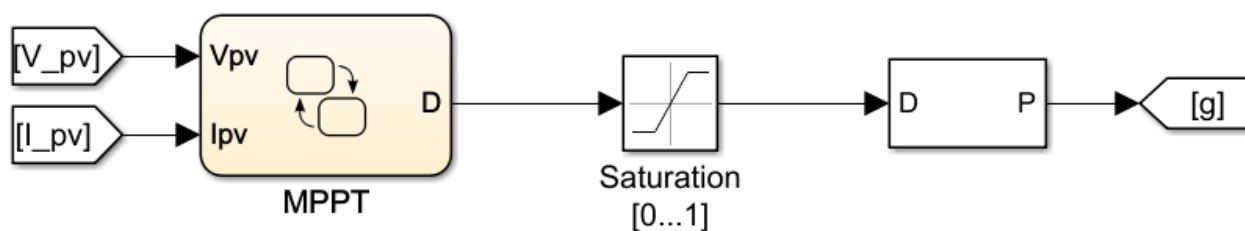


Рисунок 3.14 – Імітаційної моделі блоку пошуку точки максимальної потужності (MPPT) сонячної панелі

Блок пошуку точки максимальної потужності (MPPT) сонячної панелі реалізує алгоритм методу керування оптимізатором сонячної панелі, який зображено на рисунку 3.15.

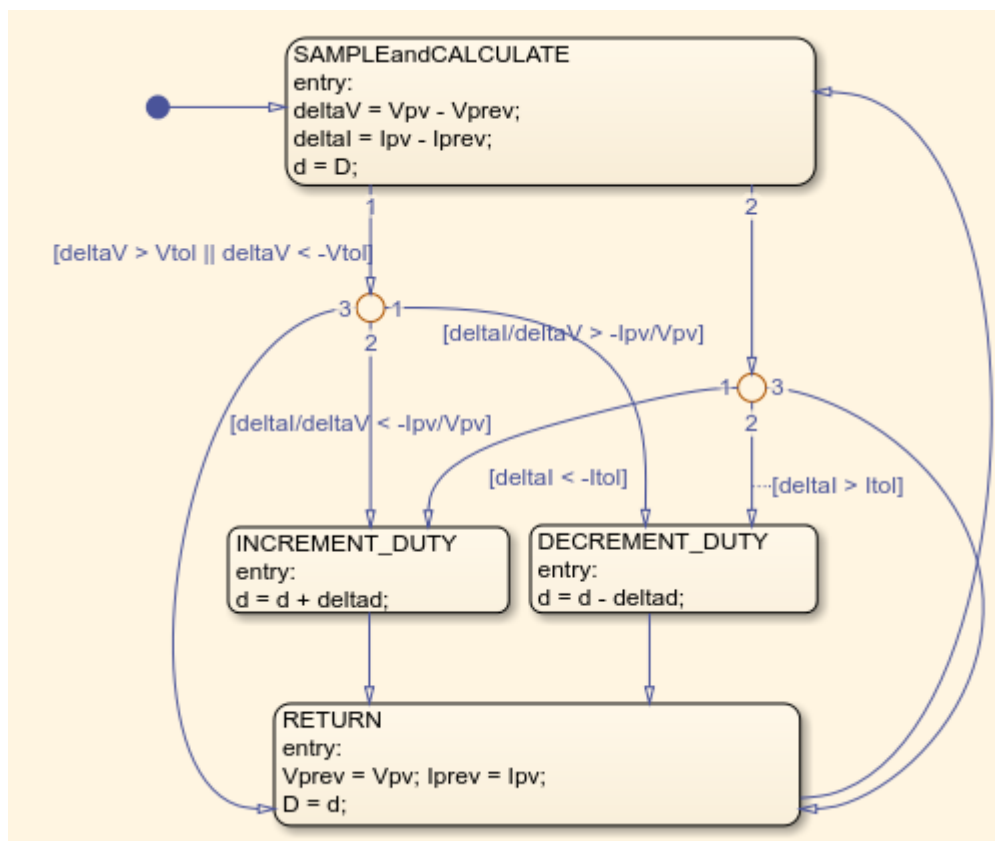


Рисунок 3.15 – Алгоритм методу керування оптимізатором сонячної панелі

Для дослідження роботи оптимізатора сонячної панелі до складу імітаційної моделі входить ще одна сонячна панель CL-P72295 китайської компанії ABISOLAR, на яку подається змінний у часі рівень випромінювання світла $G1$ та температура $25\text{ }^{\circ}\text{C}$, аналогічно першій сонячній панелі. Відмінність полягає у тому, що до виходу другої сонячної панелі приєднано таке саме

навантаження, але відсутній оптимізатором сонячної панелі, як показано на рисунку 3.16.

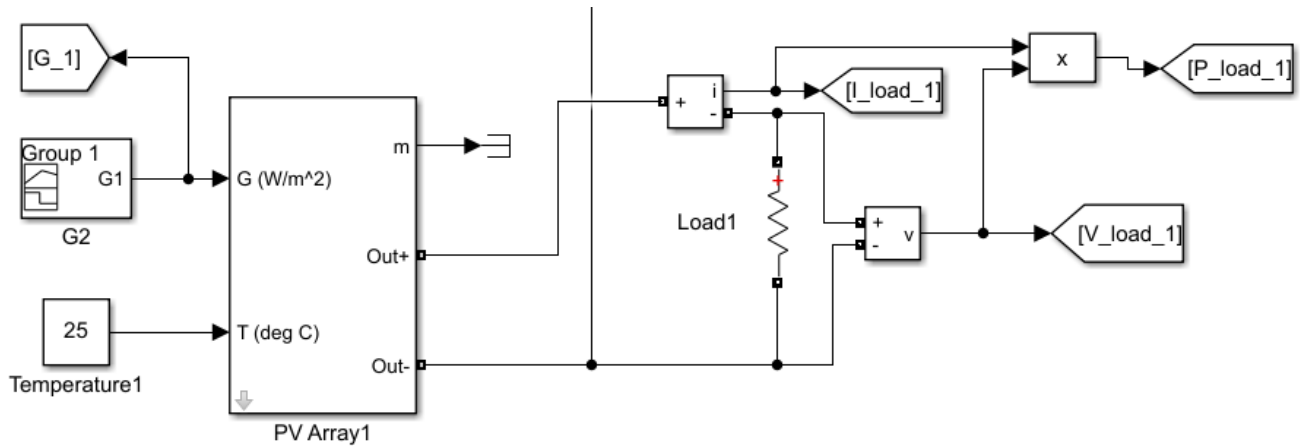


Рисунок 3.16 – Імітаційна модель другої сонячної панелі без оптимізатора сонячної панелі

В результаті проведеного імітаційного моделювання отримані графіки напруги, струму та потужності першої та другої сонячних панелей, які зображені на рисунку 3.17.

Аналіз графіків напруги, струму та потужності першої та другої сонячних панелей показує, що на навантаженні першої сонячної панелі, яка працює із оптимізатором сонячної панелі отримуємо максимально-можливу потужність при відповідному рівні випромінювання світла G1.

Про це свідчить співпадіння кривої потужності сонячної панелі (синя крива) та кривої потужності навантаження після оптимізатора сонячної панелі (жовта крива).

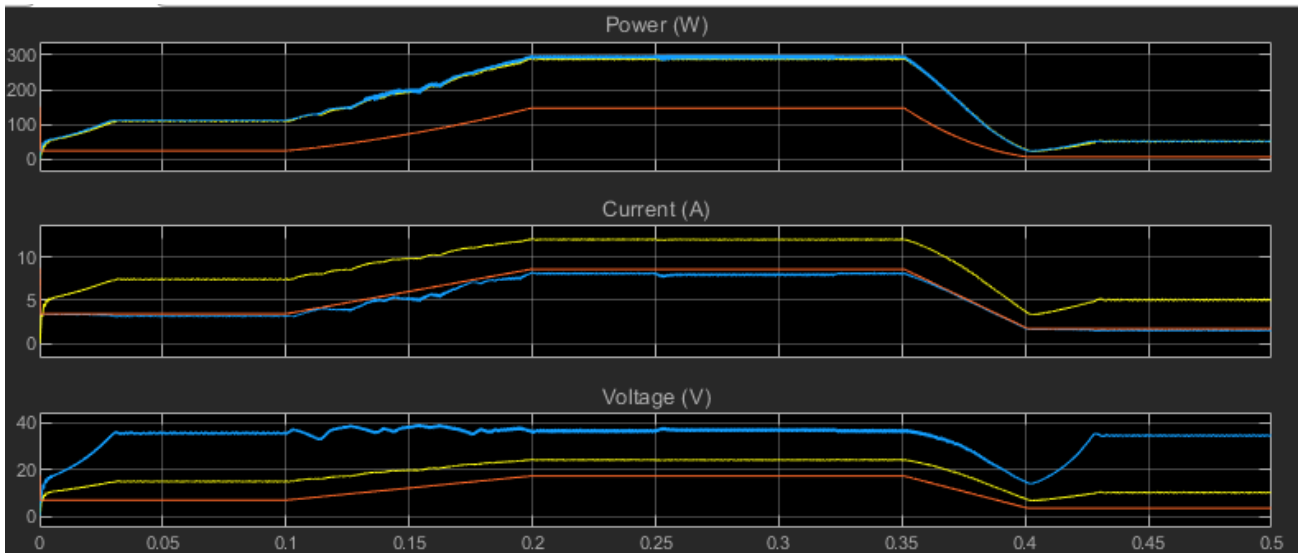


Рисунок 3.17 – Графіки напруги, струму та потужності першої та другої сонячних панелей

Потужність на навантаженні другої сонячної панелі (коричнева крива), яка працює без оптимізатора сонячної панелі, значно менша, ніж потужність сонячної панелі (синя крива). Це означає, що друга панель, яка працює без оптимізатора сонячної панелі, не працює в точці максимальної потужності сонячної панелі.

На відміну від другої сонячної панелі, перша панель працює у точці максимальної потужності. Це підтверджує графік струму першої сонячної панелі (жовта крива), де чітко видно, що струм на навантаженні першої сонячної панелі після оптимізатора сонячної панелі значно перевищує струм на навантаження другої сонячної панелі (коричнева крива).

Стосовно напруги на навантаженні першої сонячної панелі (жовта крива), то вона нижча, за напругу на виході сонячної панелі (синя крива), але напруга

після оптимізатора сонячної панелі перевищує напругу на навантаженні другої сонячної панелі, яка працює без оптимізатора сонячної панелі.

Звідси можна зробити висновок, що низьке навантаження другої сонячної панелі зменшує напругу на виході сонячної панелі, тим самим зменшуючи струм і потужність, які віддає у навантаження друга сонячна панель, яка працює без оптимізатора сонячної панелі.

Висновки до третього розділу

1. В результаті імітаційного моделювання отримали параметри еквівалентної схеми заміщення сонячної панелі CL-P72295 китайської компанії ABISOLAR, а саме: паралельний опір сонячної панелі дорівнює $R_{sh}=195,9636$ Ом, а послідовний опір сонячної панелі $R_s=0,17931$ Ом.

2. В результаті імітаційного моделювання побудовано вольт-амперні та вольт-ватні характеристики сонячної панелі CL-P72295 китайської компанії ABISOLAR для п'яти заданих рівнів випромінювання світла $G_1=1000$ Вт/м², $G_2=800$ Вт/м², $G_3=600$ Вт/м², $G_4=400$ Вт/м² і $G_5=200$ Вт/м² при температурі $T=25^{\circ}\text{C}$.

3. В результаті імітаційного моделювання побудовано вольт-амперні та вольт-ватні характеристики сонячної панелі CL-P72295 китайської компанії ABISOLAR рівні випромінювання світла $G=1000$ Вт/м² для п'яти рівнів температур $T_1=0^{\circ}\text{C}$, $T_2=20^{\circ}\text{C}$, $T_3=40^{\circ}\text{C}$, $T_4=60^{\circ}\text{C}$ і $T_5=80^{\circ}\text{C}$

4. Проведено дослідження імітаційної моделі двох послідовно з'єднаних сонячних панелей із різними рівнями випромінювання світла $G_1=1000$ Вт/м² та $G_2=500$ Вт/м² та побудовано вольт-амперну та вольт-ватну характеристики такого послідовного з'єднання сонячних панелей.

5. Для виконання імітаційного моделювання оптимізатора сонячної панелі була розроблена його імітаційна модель в середовищі Simulink, до складу якої ходять дві імітаційних моделі сонячних панелей CL-P72295 китайської компанії ABISOLAR, одна з оптимізатором сонячної панелі, а інша без нього.

6. Аналіз графіків напруги, струму та потужності першої та другої сонячних панелей показує, що на навантаженні першої сонячної панелі, яка працює із оптимізатором сонячної панелі отримуємо максимально-можливу потужність при відповідному рівні випромінювання світла G1.

4. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ МЕТОДУ КЕРУВАННЯ ОПТИМІЗАТОРА СОНЯЧНОЇ ПАНЕЛІ

4.1. Експериментальна установка дослідження методу керування оптимізатора сонячної панелі

Експериментальне дослідження методу керування оптимізатора сонячної панелі здійснювалося в лабораторії сонячної енергетики Хмельницького національного університету.

В процесі дослідження використовувалася сонячна панель CL-P72295 китайської компанії ABISOLAR, яка зображена на рисунку 4.1.



Рисунок 4.1 – Сонячна панель CL-P72295 китайської компанії ABISOLAR

В процесі дослідження використовувався оптимізатора сонячної панелі, який розроблений в лабораторії сонячної енергетики Хмельницького національного університету і зображений на рисунку 4.2.

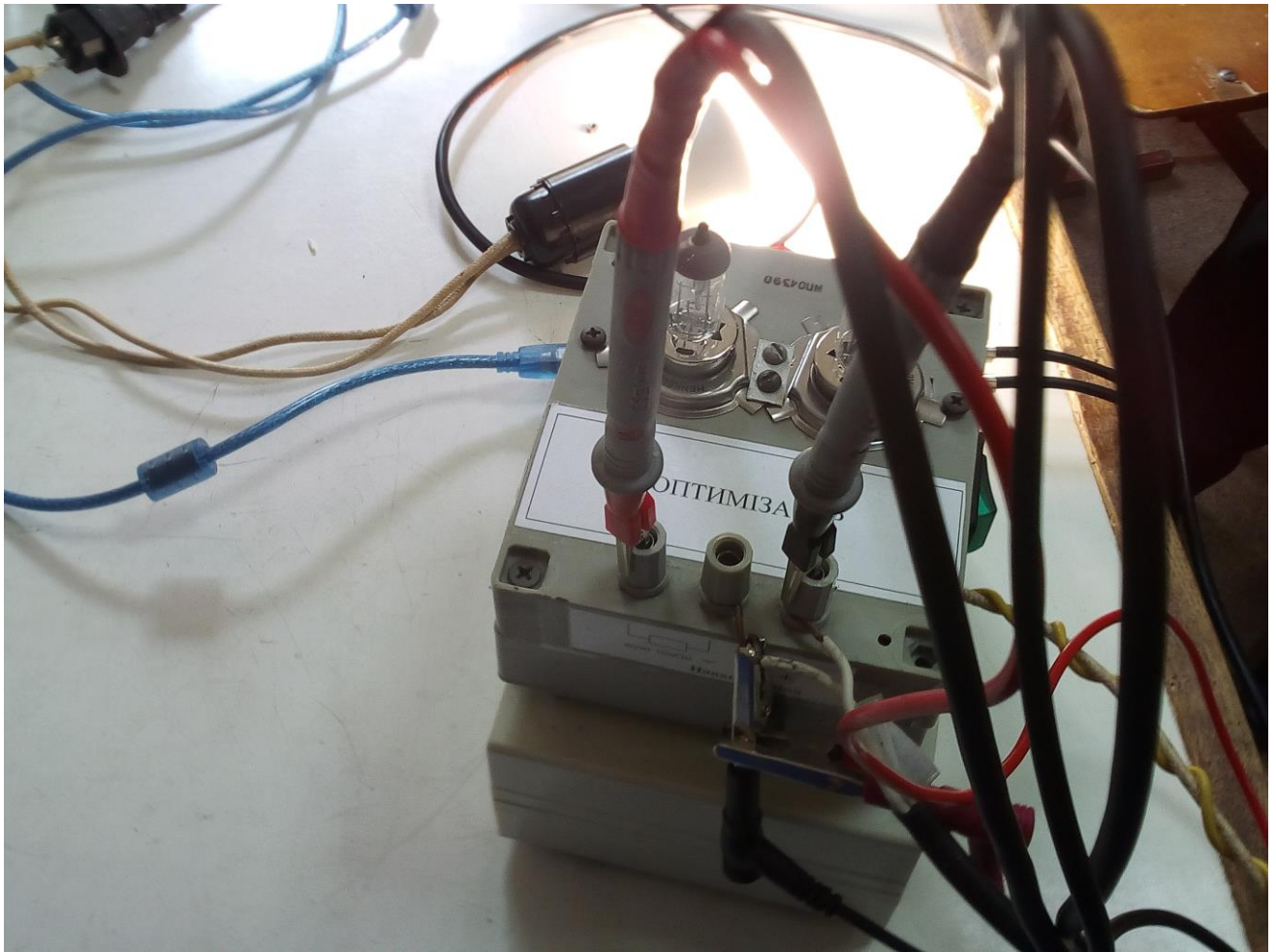


Рисунок 4.2 – Оптимізатор сонячної панелі, який розроблений в лабораторії сонячної енергетики Хмельницького національного університету

Серед основних переваг розробленого оптимізатора сонячної панелі треба відзначити:

- відчутно збільшує продуктивність сонячної системи;
- постійно відстежує точку максимальної потужності кожної сонячної панелі що робить його використання максимально ефективним;
- стабілізує вихідну напругу;
- дозволяє монтувати сонячні панелі одного стрінгу на різних схилах чи рівнях;
- дозволяє монтувати сонячне поле з частковим затіненням частини панелей.

4.2. Методика експериментального дослідження методу керування оптимізатора сонячної панелі

Для більшої достовірності результатів, розрахунок ефективності використання оптимізаторів проводили одночасно двома незалежними методами: теплоємнісним методом та методом інтегрування кривої потужності за часом.

1. Теплоємнісний метод

Метод ґрунтувався на основі порівняння приросту температури води, нагрітої енергією, одержаною від різних сонячних панелей з використанням оптимізатора і без нього.

У якості навантаження виступали нагрівачі, кожен з яких був поміщений у посудину Дюара з однаковою кількістю дистильованої води. Посудини Дюара забезпечували хорошу теплоізоляцію і мінімізували втрати енергії.

Відомо, що кількість енергії, яка необхідна для нагрівання води можна розрахувати за формулою:

$$Q = cm(T_2 - T_1) = cm\Delta T \quad (4.1)$$

де m – маса води;

c – питома теплоємність;

ΔT – різниця кінцевої і початкової температур води.

Позначимо:

Q_1 кількість енергії, одержаної від сонячної панелі без оптимізатора.

Q_2 кількість енергії, одержаної від сонячної панелі з оптимізатором.

Тоді ефективність застосування оптимізатора можемо розрахувати за формулою:

$$\eta = \left(\frac{Q_2 - Q_1}{Q_1} \right) \cdot 100\% = \left(\frac{Q_2}{Q_1} - 1 \right) \cdot 100\%. \quad (4.2)$$

Оскільки маса води в кожній посудині дюара була однаковою, то:

$$\eta = \left(\frac{\Delta T_2}{\Delta T_1} - 1 \right) \cdot 100\%, \quad (4.3)$$

де ΔT_1 – різниця температур води, нагрітої від сонячної панелі без оптимізатора;

ΔT_2 – різниця температур води, нагрітої від сонячної панелі з оптимізатором.

Теплоємнісний метод дозволяє визначити інтегральну характеристику приросту ефективності впродовж довшого часу спостережень.

2. Метод інтегрування кривої потужності за часом

Для збільшення достовірності одержаних результатів вимірювань було запропоновано метод інтегрування кривої потужності за часом, що полягав у аналізі кривої потужності, що виділялася на нагрівачах води.

Миттєву потужність яка виділяється на нагрівачеві можна розрахувати за формулою:

$$P = \frac{U^2}{R} \quad (4.4)$$

де U – спад напруги на нагрівачеві;

R – опір нагрівача.

У випадку, якщо потужність з плином часу не змінюється, то можемо визначити енергію, яка виділяється на нагрівачі за певний проміжок часу Δt за формулою:

$$A = \frac{U^2}{R} \Delta t = P \cdot \Delta t \quad (4.5)$$

У випадку імпульсної напруги, яку ми отримуємо з оптимізатора за відсутності вихідного конденсаторного фільтра, енергія, яка виділяється на нагрівачі за певний проміжок часу буде дорівнювати площі фігури обмеженої кривою потужності від часу.

Позначимо:

A_1 кількість енергії, одержаної від сонячної панелі без оптимізатора.

A_2 кількість енергії, одержаної від сонячної панелі з оптимізатором.

Тоді ефективність застосування оптимізатора можемо розрахувати за формулою:

$$\eta = \left(\frac{A_2 - A_1}{A_1} \right) \cdot 100\% = \left(\frac{A_2}{A_1} - 1 \right) \cdot 100\%. \quad (4.6)$$

Метод інтегрування на практиці дозволяє визначити ефективність тільки за короткий проміжок часу роботи (1-5 с.) Це обмеження пов'язане з великим масив одержаних даних (60 тис. вимірювань за секунду).

Температуру води визначали за допомогою двох однакових прецензійних лабораторних ртутних термометрів з ціною поділки шкали $0,1^\circ\text{C}$.

Спад напруги на нагрівачах вимірювали за допомогою USB осцилографа DisCo2 в режимі самописця з частотою 60 тис. вимірювань в секунду, який зображено на рисунку4.3 і рисунку4.4.

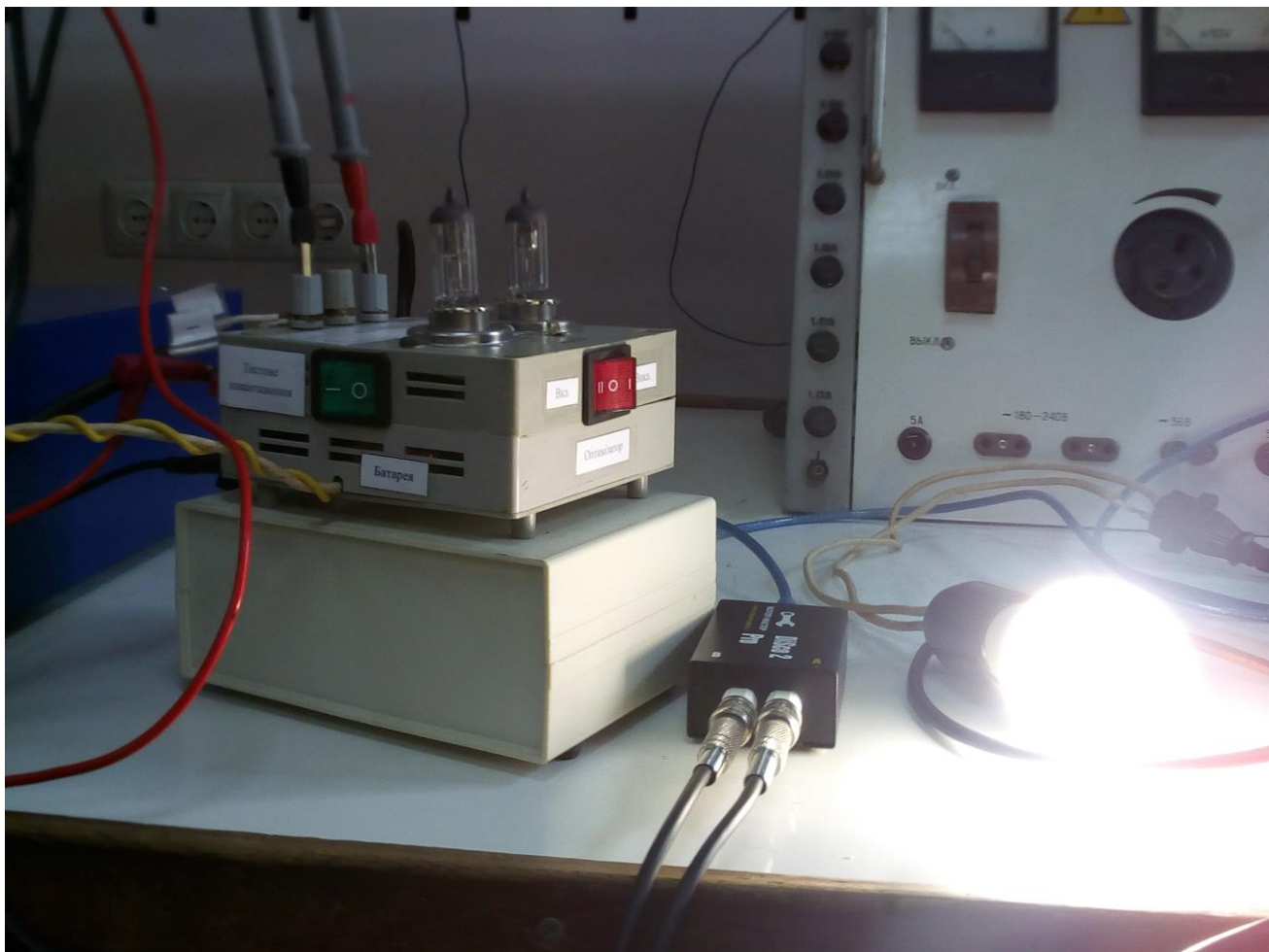


Рисунок 4.3 – Оптимізатор сонячної панелі та USB осцилограф DisCo2

Це забезпечувало достатню точність для аналізу одержаних результатів та обробки імпульсного сигналу оптимізатора.

Було проведено шість експериментів тривалістю 10 хв кожен за різних умов освітлення сонячних панелей. У кожному з проведених експериментів оптимізатор продемонстрував позитивний ефект.

Встановлено, що ефективність використання оптимізатора залежить від рівня освітлення панелей.

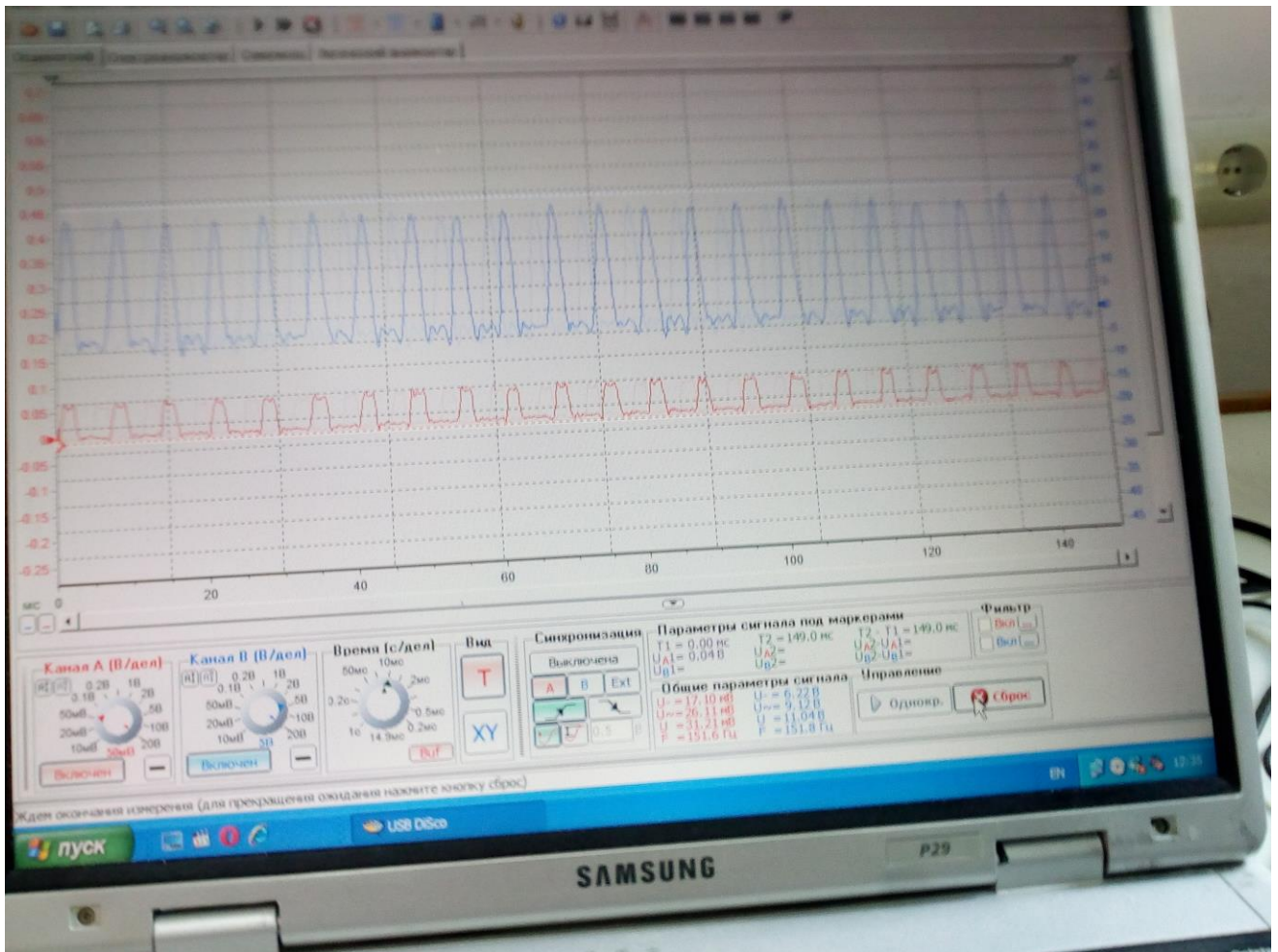


Рисунок 4.4 – Интерфейс користувача USB осцилограф DisCo2

Якщо потужність сонячної панелі узгоджується з навантаженням, (тобто ми знаходимося в околі точки максимальної потужності) то вклад оптимізатора є мінімальний. Цей ефект ми спостерігали за умов максимального освітлення.

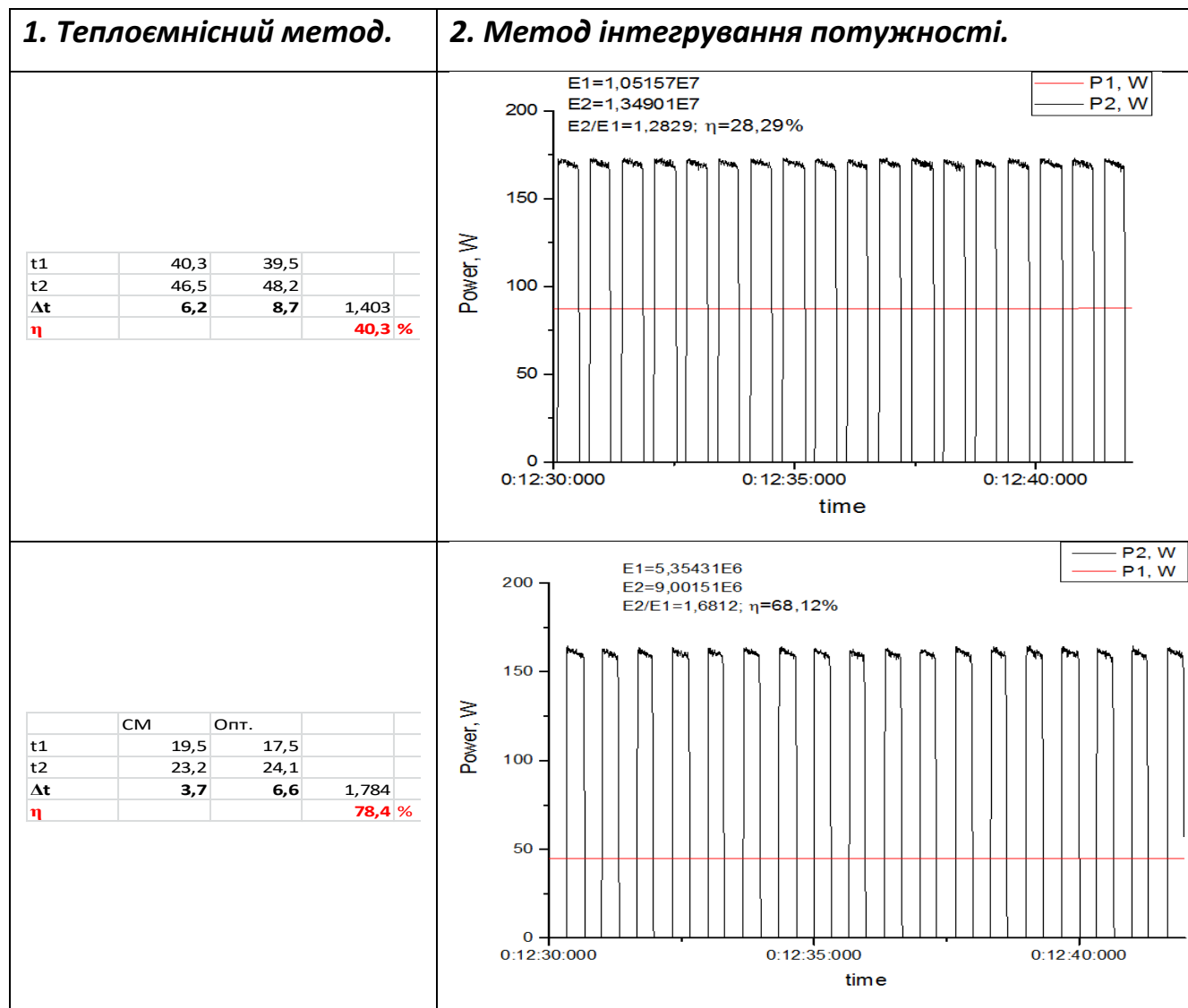
Якщо потужність сонячної панелі не узгоджується з навантаженням, (у випадку недостатнього освітлення, хмарність та ін.) то вклад оптимізатора зростає і збільшується по мірі розбалансування системи сонячний модуль - навантаження.

Також було встановлено, що два незалежні методи продемонстрували подібний результат ефективності використання оптимізатора. Це є додатковим підтвердженням їх достовірності у відповідності до таблиці 4.1.

Таблиця 4.1 – Результати порівняння експериментальних досліджень методу керування оптимізатором сонячної панелі двома методами

1. Теплоємнісний метод.					2. Метод інтегрування потужності.																													
$\eta = \left(\frac{\Delta T_2}{\Delta T_1} - 1 \right) \cdot 100\%$					$\eta = \left(\frac{A_2}{A_1} - 1 \right) \cdot 100\%$																													
<table border="1"> <thead> <tr> <th></th> <th>СМ</th> <th>Опт.</th> <th></th> <th></th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>t1</td> <td>18,8</td> <td>18</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>t2</td> <td>31,1</td> <td>30,5</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>Δt</td> <td>12,3</td> <td>12,5</td> <td>1,016</td> <td></td> </tr> <tr> <td>η</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td>1,6 %</td> </tr> </tbody> </table>						СМ	Опт.			t1	18,8	18			t2	31,1	30,5			Δt	12,3	12,5	1,016		η				1,6 %					
	СМ	Опт.																																
t1	18,8	18																																
t2	31,1	30,5																																
Δt	12,3	12,5	1,016																															
η				1,6 %																														
<table border="1"> <thead> <tr> <th></th> <th>СМ</th> <th>Опт.</th> <th></th> <th></th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>t1</td> <td>27,6</td> <td>29,4</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>t2</td> <td>39,4</td> <td>42</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>Δt</td> <td>11,8</td> <td>12,6</td> <td>1,068</td> <td></td> </tr> <tr> <td>η</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td>6,8 %</td> </tr> </tbody> </table>						СМ	Опт.			t1	27,6	29,4			t2	39,4	42			Δt	11,8	12,6	1,068		η				6,8 %					
	СМ	Опт.																																
t1	27,6	29,4																																
t2	39,4	42																																
Δt	11,8	12,6	1,068																															
η				6,8 %																														
<table border="1"> <thead> <tr> <th></th> <th>СМ</th> <th>Опт.</th> <th></th> <th></th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>t1</td> <td>31,2</td> <td>30</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>t2</td> <td>40,5</td> <td>40</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>Δt</td> <td>9,3</td> <td>10</td> <td>1,075</td> <td></td> </tr> <tr> <td>η</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td>7,5 %</td> </tr> </tbody> </table>						СМ	Опт.			t1	31,2	30			t2	40,5	40			Δt	9,3	10	1,075		η				7,5 %					
	СМ	Опт.																																
t1	31,2	30																																
t2	40,5	40																																
Δt	9,3	10	1,075																															
η				7,5 %																														
<table border="1"> <thead> <tr> <th></th> <th>СМ</th> <th>Опт.</th> <th></th> <th></th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>t1</td> <td>14</td> <td>14,7</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>t2</td> <td>27,4</td> <td>29,5</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>Δt</td> <td>13,4</td> <td>14,8</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>η</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td>10,4 %</td> </tr> </tbody> </table>						СМ	Опт.			t1	14	14,7			t2	27,4	29,5			Δt	13,4	14,8			η				10,4 %					
	СМ	Опт.																																
t1	14	14,7																																
t2	27,4	29,5																																
Δt	13,4	14,8																																
η				10,4 %																														

Таблиця 4.1 – Продовження



Враховуючи, що в Україні кількість хмарних днів змінюється від 100 на Азово-Чорноморському узбережжі до 160 днів на півночі, можемо стверджувати, що середньорічне збільшення ефективності відбору енергії з використанням оптимізатора буде становити понад 10%.

Експериментальне підтвердження цього вимагає повномасштабних випробувань та набір статистичних даних досліджень у різні пори року та за різних погодних умов.

Висновки до четвертого розділу

1. Спираючись на результати короткотривалих досліджень можемо зробити висновок, що ефективність використання оптимізатора сонячної панелі впродовж року зможе забезпечити збільшення загальної ефективності відбору енергії від сонячної панелі більш ніж на 30%.

2. Збільшення ефективності перетворення сонячного випромінювання в електричний струм досягається за рахунок постійного відстеження точки максимальної потужності безпосередньо кожного модуля із використанням запропонованого методу керування оптимізатором сонячної панелі.

3. Застосовано запропонований метод для відслідковування точки максимальної потужності кожної сонячної панелі у послідовному стрінгу таким чином, що їх енергія може бути використана у вигляді постійного чи змінного струму, або бути передана до електричної мережі за допомогою відповідних перетворювачів та інверторів.

ВИСНОВКИ

1. В результаті виконання досліджень розроблено вискоефективний та високоточний метод відслідковування точки максимальної потужності кожної сонячної панелі, що забезпечують максимальний світловий потік та роботу сонячної панелі в точці максимальної потужності при різних погодних умовах.

2. Для реалізації методу керування оптимізатором сонячної панелі використано нові методи теорії дробового числення та нелінійної динаміки, що дають можливість підвищення точності і адекватності методів та моделей.

3. Запропонована концепція ефективного відбору енергії від кожної сонячної панелі ґрунтується на передумові, що кожний ФМ в конкретний момент часу має унікальні параметри точки максимальної потужності – відповідне значення напруги і струму, за яких модуль генерує максимально доступну потужність.

4. На основі передумови, що в стрінгу всі сонячні панелі не можуть працювати в точці максимальної потужності, якщо його сформовано прямим електричним з'єднанням сонячних панелей, запропоновано метод керування оптимізатором сонячної панелі, який дозволяє кожній сонячній панелі у стрінгу індивідуально генерувати максимальну доступну потужність, тим самим забезпечує одержання більше енергії з системи в цілому.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Amir A., Selvaraj J., & Rahim N.A.. Study of the MPP tracking algorithms: Focusing the numerical method techniques // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2016, V. 62, P. 350-371.
2. Gupta A., Chauhan Y.K., & Pachauri, R.K. A comparative investigation of maximum power point tracking methods for solar PV system // *Solar Energy*, 2016, V. 136, P. 236-253.
3. Verma D., Nema S., Shandilya A.M. & Dash S. K. Maximum power point tracking (MPPT) techniques: Recapitulation in solar photovoltaic systems // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2016, V. 54, P. 1018-1034.
4. Ram J.P., Babu T.S. & Rajasekar N. A comprehensive review on solar PV maximum power point tracking techniques // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2017, V. 67, P. 826-847.
5. Motahhir S., El Ghzizal A., Sebti S., & Derouich A. (2016). Shading effect to energy withdrawn from the photovoltaic panel and implementation of DMPPT using C language // *International review of automatic control*, 2016, V. 9(2), P. 88-94.
6. Tey K.S. & Mekhilef S. Modified incremental conductance MPPT algorithm to mitigate inaccurate responses under fastchanging solar irradiation level // *Solar Energy*, 2014, V. 101, P. 333-342.
7. Motahhir S., El Ghzizal A., Sebti, S. & Derouich A. MIL and SIL and PIL tests for MPPT algorithm // *Cogent Engineering*, 2017, V. 4, 137-147.
8. Elbaset A.A., Ali H., Abd-El Sattar M. & Khaled M. Implementation of a modified perturb and observe maximum power point tracking algorithm for photovoltaic system using an embedded microcontroller // *IET Renewable Power Generation*, 2016, V. 10(4), P. 551-560.
9. Al Nabulsi A. & Dhaouadi R. Efficiency optimization of a DSP-based standalone PV system using fuzzy logic and dual-MPPT control // *IEEE Transactions*

on Industrial Informatics, 2012, V. 8(3), P. 573-584.

10. Elgendy M.A., Zahawi B. & Atkinson D.J. Assessment of perturb and observe MPPT algorithm implementation techniques for PV pumping applications // IEEE transactions on sustainable energy, 2012, V. 3(1), P. 21-33.

11. Motahhir S., El Ghzizal A., Sebti S. & Derouich A. Proposal and Implementation of a novel perturb and observe algorithm using embedded software // 3rd International Renewable and Sustainable Energy Conference (IRSEC), 2015, P. 1-5.

12. Piegari L. & Rizzo R. Adaptive perturb and observe algorithm for photovoltaic maximum power point tracking // IET Renewable Power Generation, 2010, V. 4, P. 317-328.

13. Femia N., Petrone G., Spagnuolo G. & Vitelli M. Optimization of perturb and observe maximum power point tracking method // IEEE transactions on power electronics, 2005, V. 20(4), P. 963-973.

14. Femia N., Granozio D., Petrone G. & Vitelli M. Predictive & adaptive MPPT perturb and observe method // IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2007, V. 43(3).

15. Abdelsalam A.K., Massoud A.M., Ahmed S. & Enjeti P.N. High-performance adaptive perturb and observe MPPT technique for photovoltaic-based microgrids // IEEE Transactions on Power Electronics, 2011, V. 26(4), P. 1010-1021.

16. Ishaque K., Salam Z. & Lauss G. The performance of perturb and observe and incremental conductance maximum power point tracking method under dynamic weather conditions // Applied Energy, 2016, V. 119, 228-236.

17. Soon T.K. & Mekhilef S. A fast-converging MPPT technique for photovoltaic system under fast-varying solar irradiation and load resistance // IEEE transactions on industrial informatics, 2015, V. 11(1), P. 176-186.

18. Radjai T., Rahmani L., Mekhilef S. & Gaubert J.P. Implementation of a modified incremental conductance MPPT algorithm with direct control based on a

fuzzy duty cycle change estimator using dSPACE // *Solar Energy*, 2014, V. 110, P. 325-337.

19. Sekhar P.C. & Mishra S. Takagi–Sugeno fuzzy-based incremental conductance algorithm for maximum power point tracking of a photovoltaic generating system // *IET Renewable Power Generation*, 2016, V. 8(8), P. 900-914.

20. Zakzouk N.E., Elsharty M.A., Abdelsalam A.K., Helal A.A. & Williams B.W. Improved performance low-cost incremental conductance PV MPPT technique // *IET Renewable Power Generation*, 2016, V. 10(4), P. 561-574.

21. Motahhir S., El Ghzizal A., Sebti S. & Derouich A. (2017). Modeling of Photovoltaic System with modified Incremental Conductance Algorithm for fast changes of irradiance // *International Journal of Photoenergy*, 2018, V. 2018, P. 1-13.

22. Ishaque K. & Salam Z. A review of maximum power point tracking techniques of PV system for uniform insolation and partial shading condition // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2013, V. 19, 475-488.

23. Patel H. & Agarwal V. MATLAB-based modeling to study the effects of partial shading on PV array characteristics // *IEEE transactions on energy conversion*, 2013, V. 23(1), P. 302-310.

24. Motahhir S., Chalh A., Ghzizal A., Sebti S. & Derouich A. Modeling of Photovoltaic Panel by using Proteus // *Journal of Engineering Science and Technology Review*, 2017, V. 10 (2), P. 8-13.

25. Barth N., Jovanovic R., Ahzi S. & Khaleel M.A. PV panel single and double diode models: optimization of the parameters and temperature dependence // *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2016, V. 148, P. 87-98.

26. Nishioka K., Sakitani N., Uraoka Y. & Fuyuki T. Analysis of multicrystalline silicon solar cells by modified 3-diode equivalent circuit model taking leakage current through periphery into consideration // *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2007, V. 91(13), P. 1222-1227.

27. Yildiran N. & Tacer E. Identification of photovoltaic cell single diode

discrete model parameters based on datasheet values // *Solar Energy*, 2016, V. 127, P. 175-183.

28. Ishaque K., Salam Z., Mekhilef S. & Shamsudin A. (2012). Parameter extraction of solar photovoltaic modules using penalty-based differential evolution // *Applied Energy*, 2012, V. 99, P. 297-308.

29. AlHajri M.F., El-Naggar K.M., AlRashidi M.R., & Al-Othman A.K. Optimal extraction of solar cell parameters using pattern search // *Renewable Energy*, 2012, V. 44, P. 238-245.

30. Carrero C., Amador J. & Arnaltes S. A single procedure for helping PV designers to select silicon PV modules and evaluate the loss resistances // *Renewable Energy*, 2007, V. 32(15), P 2579-2589.

31. Ahmed J. & Salam Z. A Modified P&O Maximum Power Point Tracking Method with Reduced Steady-State Oscillation and Improved Tracking Efficiency // *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 2016, V. 7(4), P. 1506-1515.

32. Motahhir S., El Ghzizal A., Sebti S. & Derouich A. Une ressource pédagogique pour l'enseignement par simulation: cas des panneaux photovoltaïques. *International Workshop on Pedagogic Approaches & E-Learning*, 2015.

33. Villalva M.G., Gazoli J.R. & Ruppert Filho E. Modeling and circuit-based simulation of photovoltaic arrays // *In Power Electronics Conference, 2009. COBEP'09. Brazilian* (pp. 1244-1254). IEEE.

34. Drissi H., Khediri J., Zaafrane W. & Braiek E.B. (2017). Critical factors affecting the photovoltaic characteristic and comparative study between two maximum power point tracking algorithms // *International Journal of Hydrogen Energy*, 2007, V. 42(13), P. 8689-8702.

35. Mertens K. *Photovoltaics: fundamentals, technology and practice*. John Wiley & Sons, 2013.

36. McEvoy A., Markvart T., Castañer L., Markvart T. & Castaner L. *Practical handbook of photovoltaics: fundamentals and applications*. Elsevier, 2003.

Додаток А

Стаття у фаховому журналі

УДК 621.315

В.В. МАРТИНЮК
Хмельницький національний університет
А.Д. ГРЕБІНЧУК
Хмельницький національний університет

МЕТОД КЕРУВАННЯ ОПТИМІЗАТОРОМ СОНЯЧНОЇ ПАНЕЛІ

В роботі на основі проведеного аналізу особливості будови оптимізатора сонячної панелі, встановлено вимоги до основних методів відслідковування точки максимальної потужності. Запропоновано метод керування оптимізатором сонячної панелі, який базується на розрахунку струму в точці максимальної потужності I_{mp} та напруги в точці максимальної потужності U_{mp} при виміряних значеннях інтенсивності сонячного випромінювання та температури сонячної панелі. Розроблена імітаційна модель оптимізатора сонячної панелі в середовищі Simulink, до складу якої ходять дві імітаційних моделі сонячних панелей CL-P72295 китайської компанії ABISOLAR, одна з оптимізатором сонячної панелі, а інша без нього.

Keywords: метод керування оптимізатором сонячної панелі, сонячна панель, точки максимальної потужності.

V.V. MARTYNYUK
Khmelnitsky national university
A.D. Grebinchuk
Khmelnitsky national university

METHOD OF CONTROLLING THE SOLAR PANEL OPTIMIZER

In the work, based on the analysis of the peculiarities of the structure of the solar panel optimizer, the requirements for the main methods of tracking the point of maximum power are established. A method of controlling the solar panel optimizer is proposed, which is based on the calculation of the current at the point of maximum power I_{mp} and the voltage at the point of maximum power U_{mp} at the measured values of solar radiation intensity and temperature of the solar panel. A simulation model of the solar panel optimizer in the Simulink environment was developed, which includes two simulation models of CL-P72295 solar panels from the Chinese company ABISOLAR, one with the solar panel optimizer and the other without it.

Keywords: solar panel optimizer control method, solar panel, maximum power points.

1. Вступ

Для будь-якого заданого набору робочих умов фотогальванічний елемент має одну робочу точку, де значення струму (I) та напруги (U) фотогальванічного елемента призводять до максимальної вихідної потужності.

В точці максимальної потужності крива графіка зменшується з обох боків і відповідає режиму, в якому фотогальванічний елемент працює з максимальною ефективністю та генерує максимальну вихідну потужність. Коли фотогальванічний елемент безпосередньо з'єднаний з навантаженням, робоча точка фотогальванічного елемента перебуватиме на перетин вольт-амперної характеристики фотогальванічного елемента та вольт-амперної характеристики навантаження.

Оптимізатор сонячної панелі використовує перетворювач постійної напруги для регулювання напруги фотогальванічного елемента та встановлення цієї напруги в точку максимальної потужності, забезпечуючи узгодження навантаження максимальної передачі потужності. Він може забезпечити вихідну напругу вище або нижче за вхідну напругу. Метою перетворювача постійного струму є узгодження опору навантаження із оптимальним імпедансом сонячної панелі. Тим не менш, точка максимальної потужності не фіксована і змінюється в залежності від різних факторів, таких як освітленість і температура.

Враховуючи, що крива вольт-амперної характеристики фотогальванічного елемента залежить від рівня випромінювання світла та температури сонячної панелі, необхідно керувати положенням точки максимальної потужності для того, щоб отримати максимальну потужність фотогальванічного елемента.

Існує багато різних підходів до максимізації потужності фотогальванічних елементів. До основних методів відслідковування точки максимальної потужності відносяться наступні методи.

1. Метод постійної напруги.
2. Метод холостого ходу за напругою.
3. Метод короткого замикання за струмом.
4. Метод приросту провідності.
5. Метод збурення та спостереження.

Переваги методів постійної напруги та холостого ходу за напругою наступні.

1. Відносно низька вартість.
2. Дуже простий та легкий у реалізації.

Недоліки методів постійної напруги та холостого ходу за напругою наступні.

1. Не точний і не може працювати рівно у точці максимальної потужності.
2. Повільний відгук U_{mp} у разі зміни U_{oc} .

Переваги використання методу струму короткого замикання наступні.

1. Простота та низька вартість реалізації.
2. Найкращий метод в умовах недостатньої інсоляції.

Недоліки методу струму короткого замикання наступні.

1. Дані відрізняються залежно від розташування та погодних умов.
2. Метод має низьку ефективність.

У цих методах потрібно ретельно вибирати значення константи k , щоб точно відкалібрувати фотогальванічний елемент.

Переваги методу приросту провідності наступні.

1. Метод приросту провідності може визначити точки максимальної потужності без коливання навколо цього значення.

Недоліки методу приросту провідності наступні.

1. Метод приросту провідності може створювати коливання і нестабільно працювати в атмосферних умовах, які швидко змінюються.

2. Час обчислення збільшується через невелику частоту зчитування даних, обумовлену більш високою складністю алгоритму в порівнянні з методом збурення та спостереження.

Переваги використання методу збурення та спостереження наступні.

1. Відносно проста реалізація.
2. Невелика вартість.
3. Відносно точний метод пошуку точки максимальної потужності.

Обмеження при використанні методу збурення та спостереження наступні.

1. Алгоритм не може визначити, коли він фактично досяг точки максимальної потужності.
2. Вихідна потужність коливається навколо точки максимальної потужності.
3. Метод збурення та спостереження досить повільний, якщо напруга знаходиться далеко від точки максимальної потужності.

2. Метод керування оптимізатором сонячної панелі

Особливістю запропонованого методу керування оптимізатором сонячної панелі є початковий розрахунок паралельного опору R_{sh} та послідовного опору R_s сонячної панелі, використовуючи параметри сонячної панелі, які надає виробник сонячної панелі. Далі здійснюється розрахунок струму в точці максимальної потужності I_{mp} та напруги в точці максимальної потужності U_{mp} , при вимірних значеннях інтенсивності сонячного випромінювання та температури сонячної панелі.

В якості оптимізатора сонячної панелі будемо використовувати перетворювач постійної напруги сонячної панелі у постійну напругу навантаження. Оптимізатор сонячної панелі використовує перетворювач постійної напруги для регулювання вхідної напруги на сонячній панелі, а також забезпечення узгодження навантаження для максимальної передачі потужності від сонячної панелі до навантаження.

Вихідна напруга сонячної панелі може бути вищою або нижчою, ніж в точці максимальної потужності при певних значеннях інтенсивності сонячного випромінювання, температури та опору навантаження сонячної панелі.

Високоєфективний оптимізатор сонячної панелі використовує перетворення напруги постійного струму в низьку або вищу напругу за допомогою понижуючого-підвищуючого перетворювача. Для реалізації запропонованого методу керування оптимізатором сонячної панелі розроблено структурна схема оптимізатора сонячної панелі, яка зображена на рис. 1.

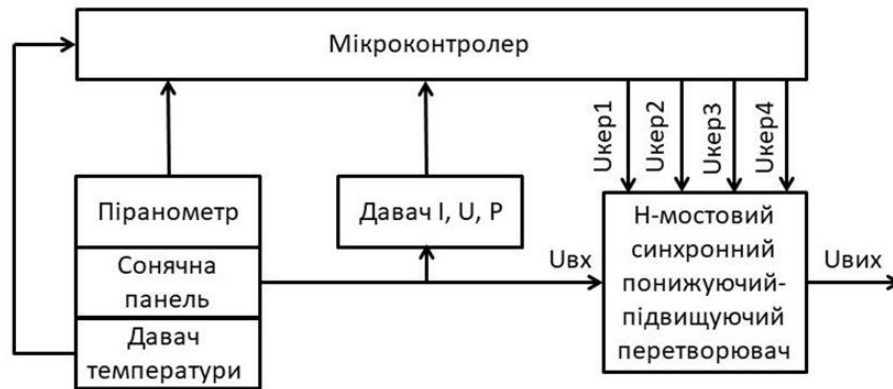


Рис. 1. Структурна схема оптимізатора сонячної панелі

До складу структурної схеми оптимізатора сонячної панелі входить давач піранометр – давач рівня освітленості сонячної панелі, давач температури панелі, давач струму, напруги та потужності сонячної панелі, а також Н-мостовий синхронний понижуючий-підвищуючий перетворювач постійної напруги і мікроконтролер.

Для виконання імітаційного моделювання оптимізатора сонячної панелі була розроблена імітаційна модель в середовищі Simulink, яка зображена на рис. 2.

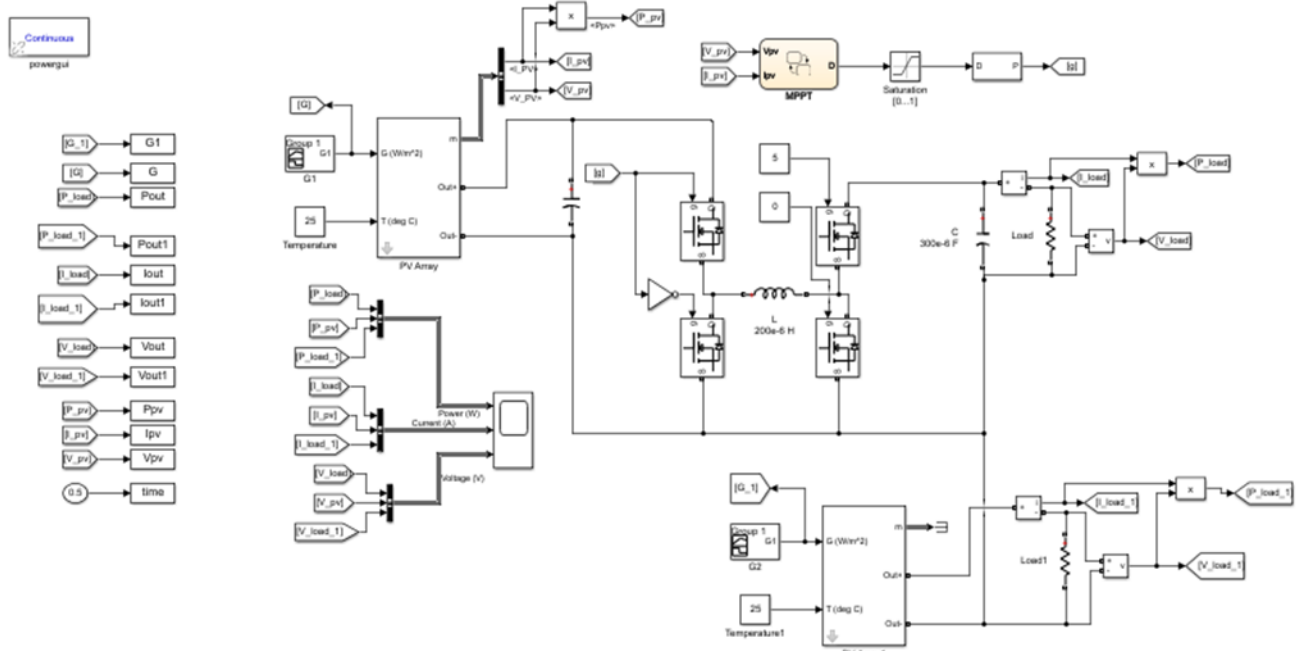


Рис. 2. Імітаційна модель оптимізатора сонячної панелі в середовищі Simulink

У відповідності до рисунку 2, до складу імітаційної моделі оптимізатора сонячної панелі входять дві імітаційних моделі сонячної панелі CL-P72295 китайської компанії ABISOLAR. До виходу першої сонячної панелі приєднано оптимізатор сонячної панелі, побудований за схемою Н-мостового синхронного понижуючого-підвищуючого перетворювача постійної напруги.

Для дослідження роботи оптимізатора сонячної панелі до складу імітаційної моделі входить ще одна сонячна панель CL-P72295 китайської компанії ABISOLAR, на яку подається змінний у часі рівень випромінювання світла $G1$ та температура $25\text{ }^{\circ}\text{C}$, аналогічно першій сонячній панелі. Відмінність полягає у тому, що до виходу другої сонячної панелі приєднано таке саме навантаження, але відсутній оптимізатор сонячної панелі. В результаті проведеного імітаційного моделювання отримані графіки напруги, струму та потужності першої та другої сонячних панелей, які зображені на рис. 3.

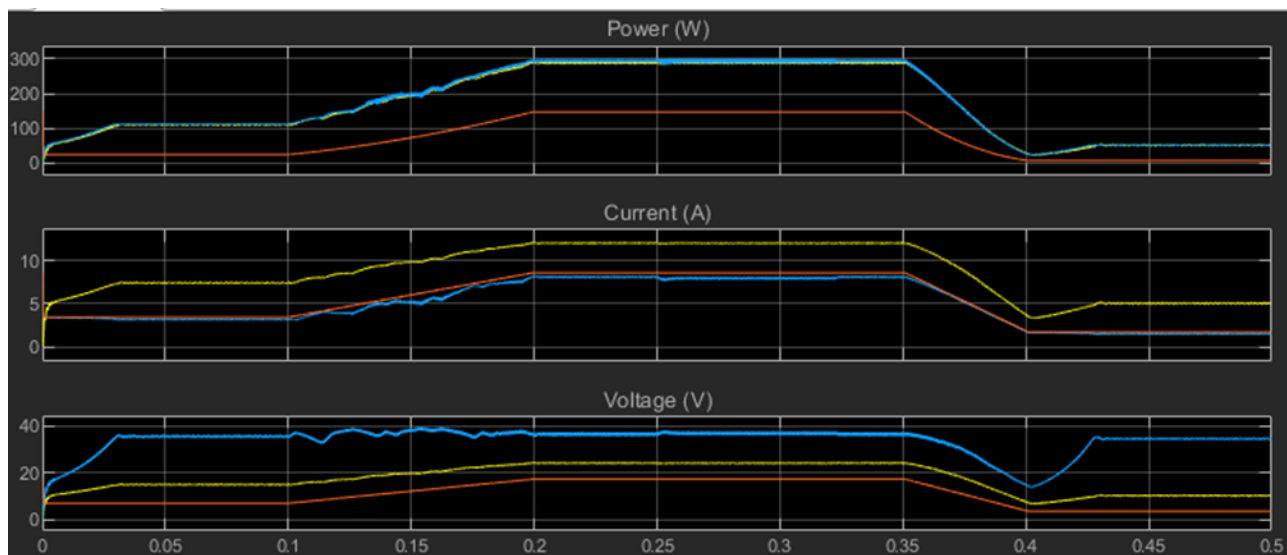


Рис. 2. Графіки напруги, струму та потужності першої та другої сонячних панелей

3. Висновки

Потужність на навантаженні другої сонячної панелі (коричнева крива), яка працює без оптимізатора сонячної панелі, значно менша, ніж потужність сонячної панелі (синя крива). Це означає, що друга панель, яка працює без оптимізатора сонячної панелі, не працює в точці максимальної потужності сонячної панелі.

На відміну від другої сонячної панелі, перша панель працює у точці максимальної потужності. Це підтверджує графік струму першої сонячної панелі (жовта крива), де чітко видно, що струм на навантаженні першої сонячної панелі після оптимізатора сонячної панелі значно перевищує струм на навантаження другої сонячної панелі (коричнева крива).

Стосовно напруги на навантаженні першої сонячної панелі (жовта крива), то вона нижча, за напругу на виході сонячної панелі (синя крива), але напруга після оптимізатора сонячної панелі перевищує напругу на навантаженні другої сонячної панелі, яка працює без оптимізатора сонячної панелі.

Звідси можна зробити висновок, що низьке навантаження другої сонячної панелі зменшує напругу на виході сонячної панелі, тим самим зменшуючи струм і потужність, які віддає у навантаження друга сонячна панель, яка працює без оптимізатора сонячної панелі.

Література

1. Amir A., Selvaraj J., & Rahim N.A.. Study of the MPP tracking algorithms: Focusing the numerical method techniques // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2016, V. 62, P. 350-371.
2. Gupta A., Chauhan Y.K., & Pachauri, R.K. A comparative investigation of maximum power point tracking methods for solar PV system // *Solar Energy*, 2016, V. 136, P. 236-253.
3. Verma D., Nema S., Shandilya A.M. & Dash S. K. Maximum power point tracking (MPPT) techniques: Recapitulation in solar photovoltaic systems // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2016, V. 54, P. 1018-1034.
4. Ram J.P., Babu T.S. & Rajasekar N. A comprehensive review on solar PV maximum power point tracking techniques // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2017, V. 67, P. 826-847.
5. Motahhir S., El Ghzizal A., Sebti S., & Derouich A. (2016). Shading effect to energy withdrawn from the photovoltaic panel and implementation of DMPPT using C language // *International review of automatic control*, 2016, V. 9(2), P. 88-94.
6. Tey K.S. & Mekhilef S. Modified incremental conductance MPPT algorithm to mitigate inaccurate responses under fastchanging solar irradiation level // *Solar Energy*, 2014, V. 101, P. 333-342.
7. Motahhir S., El Ghzizal A., Sebti, S. & Derouich A. MIL and SIL and PIL tests for MPPT algorithm // *Cogent Engineering*, 2017, V. 4, 137-147.
8. Elbaset A.A., Ali H., Abd-El Sattar M. & Khaled M. Implementation of a modified perturb and observe maximum power point tracking algorithm for photovoltaic system using an embedded microcontroller // *IET Renewable Power Generation*, 2016, V. 10(4), P. 551-560.
9. Al Nabulsi A. & Dhaouadi R. Efficiency optimization of a DSP-based standalone PV system using fuzzy logic and dual-MPPT control // *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2012, V. 8(3), P. 573-584.

10. Elgendy M.A., Zahawi B. & Atkinson D.J. Assessment of perturb and observe MPPT algorithm implementation techniques for PV pumping applications // IEEE transactions on sustainable energy, 2012, V. 3(1), P. 21-33.
11. Motahhir S., El Ghzizal A., Sebti S. & Derouich A. Proposal and Implementation of a novel perturb and observe algorithm using embedded software // 3rd International Renewable and Sustainable Energy Conference (IRSEC), 2015, P. 1-5.
11. Motahhir S., El Ghzizal A., Sebti S. & Derouich A. Proposal and Implementation of a novel perturb and observe algorithm using embedded software // 3rd International Renewable and Sustainable Energy Conference (IRSEC), 2015, P. 1-5.
12. Piegari L. & Rizzo R. Adaptive perturb and observe algorithm for photovoltaic maximum power point tracking // IET Renewable Power Generation, 2010, V. 4, P. 317-328.
13. Femia N., Petrone G., Spagnuolo G. & Vitelli M. Optimization of perturb and observe maximum power point tracking method // IEEE transactions on power electronics, 2005, V. 20(4), P. 963-973.
14. Femia N., Granozio D., Petrone G. & Vitelli M. Predictive & adaptive MPPT perturb and observe method // IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2007, V. 43(3).
15. Abdelsalam A.K., Massoud A.M., Ahmed S. & Enjeti P.N. High-performance adaptive perturb and observe MPPT technique for photovoltaic-based microgrids // IEEE Transactions on Power Electronics, 2011, V. 26(4), P. 1010-1021.
16. Ishaque K., Salam Z. & Lauss G. The performance of perturb and observe and incremental conductance maximum power point tracking method under dynamic weather conditions // Applied Energy, 2016, V. 119, 228-236.

ДИПЛОМНА РОБОТА НА ТЕМУ:

Метод керування оптимізатором сонячної панелі

Виконав
ст. гр. АКІТм-21-1
Аліна ГРЕБІНЧУК

Науковий керівник
д.т.н., проф.
Валерій МАРТИНЮК

Додаток Б
Презентація

Актуальність теми. Основним способом підвищення ефективності сонячної панелі є використання методу пошуку точки максимальної потужності (ТМП), електронним пристроєм – оптимізатором сонячної панелі, що значно підвищує ефективність системи. Таким чином, ефективне керування оптимізатором сонячної панелі підвищує ефективність сонячних панелей, тим самим знижуючи загальну вартість системи.

Мета і завдання дослідження. Метою дослідження є підвищення ефективності сонячних панелей шляхом розробки методу керування оптимізатором сонячної панелі в реальному масштабі часу.

Для досягнення цієї мети необхідно розв'язати такі завдання:

- розробити структурну схему оптимізатора сонячної панелі;
- розробити імітаційну модель методу керування оптимізатором сонячної панелі;
- розробити метод керування оптимізатором сонячної панелі.

• **Об'єкт дослідження** – процес керування оптимізатором сонячної панелі.

• **Предмет дослідження** – розробка методу керування оптимізатором сонячної панелі.

• **Методи досліджень.** При вирішенні поставлених завдань у роботі були використані методи фізики, теорії автоматичного керування, методи обчислювальної математики, а також методи алгоритмізації та програмування.

• **Наукова новизна одержаних результатів.** У результаті проведеного дослідження:

- 1. Розроблено метод керування оптимізатором сонячної панелі, який базується на розрахунку струму в точці максимальної потужності I_{mp} та напруги в точці максимальної потужності U_{mp} при виміряних значеннях інтенсивності сонячного випромінювання та температури сонячної панелі.

• **Практична значимість отриманих результатів:**

- У роботі розроблена імітаційна модель оптимізатора сонячної панелі в середовищі Simulink, до складу якої входять дві імітаційних моделі сонячних панелей CL-P72295 китайської компанії ABISOLAR, одна з оптимізатором сонячної панелі, а інша без нього.

Вольт-амперна та вольт-ватна характеристики фотогальванічного елемента

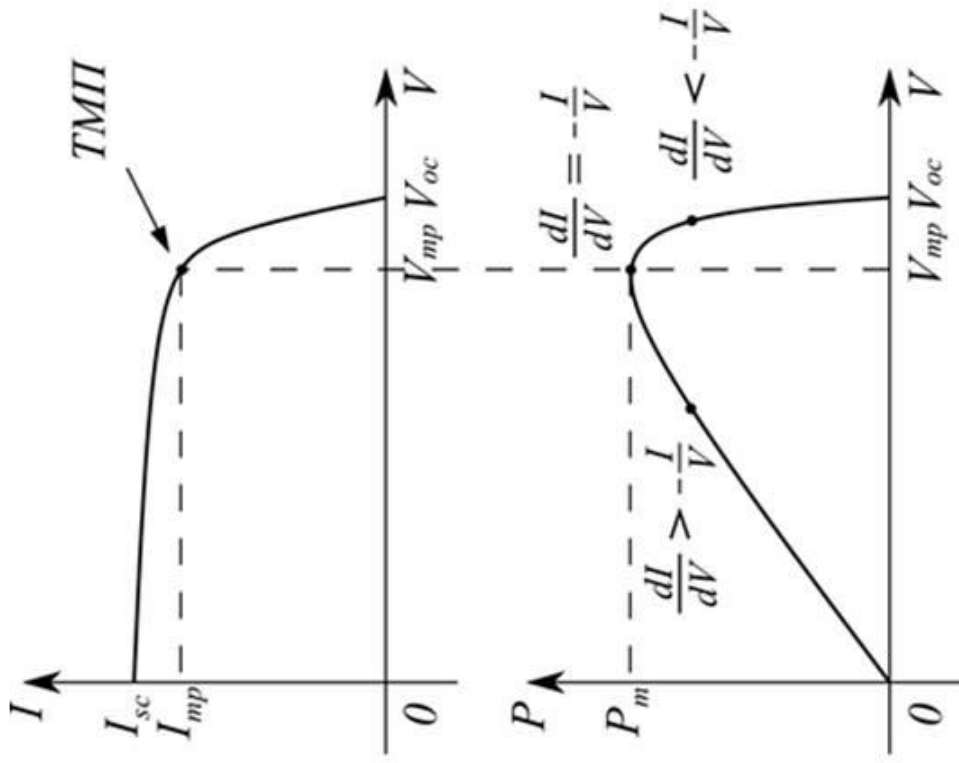


Рисунок 1 – Вольт-амперна та вольт-ватна характеристики фотогальванічного елемента

Навантажувальні лінії, проведені для трьох різних значень опору R фотогальванічного елемента

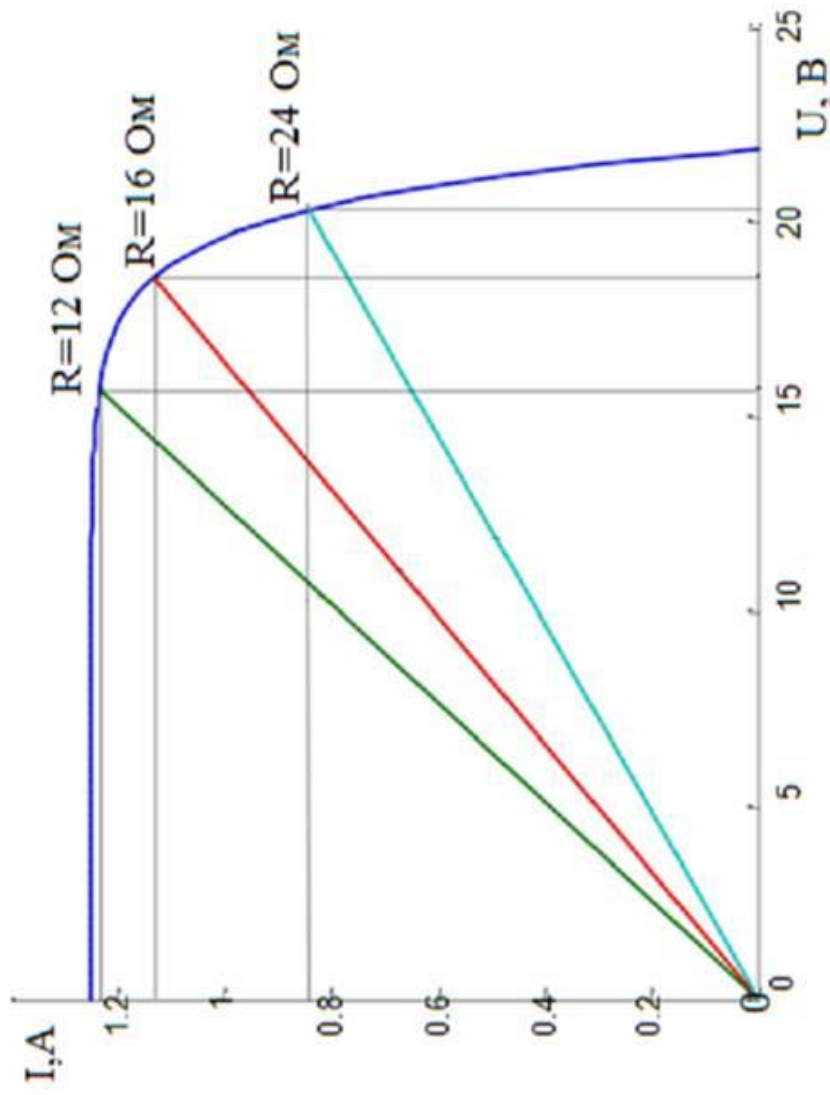


Рисунок 2 - Навантажувальні лінії, проведені для трьох різних значень опору R фотогальванічного елемента

МЕТОД КЕРУВАННЯ ОПТИМІЗАТОРОМ СОНЯЧНОЇ ПАНЕЛІ ⁵

Особливістю запропонованого методу керування оптимізатором сонячної панелі є початковий розрахунок паралельного опору R_{sh} та послідовного опору R_s сонячної панелі, використовуючи параметри сонячної панелі, які надає виробник сонячної панелі.

Особливістю методу керування оптимізатором сонячної панелі є розрахунок струму в точці максимальної потужності I_{mp} та напруги в точці максимальної потужності U_{mp} , при вимірних значеннях інтенсивності сонячного випромінювання та температури сонячної панелі.

Високоєфективний оптимізатор сонячної панелі використовує перетворення напруги постійного струму в низьку або вищу напругу за допомогою понижуючого-підвищуючого перетворювача.

Схема електрична принципова Н-мостового синхронного
 понижуючого-підвищуючого перетворювача постійної
 напруги енергії

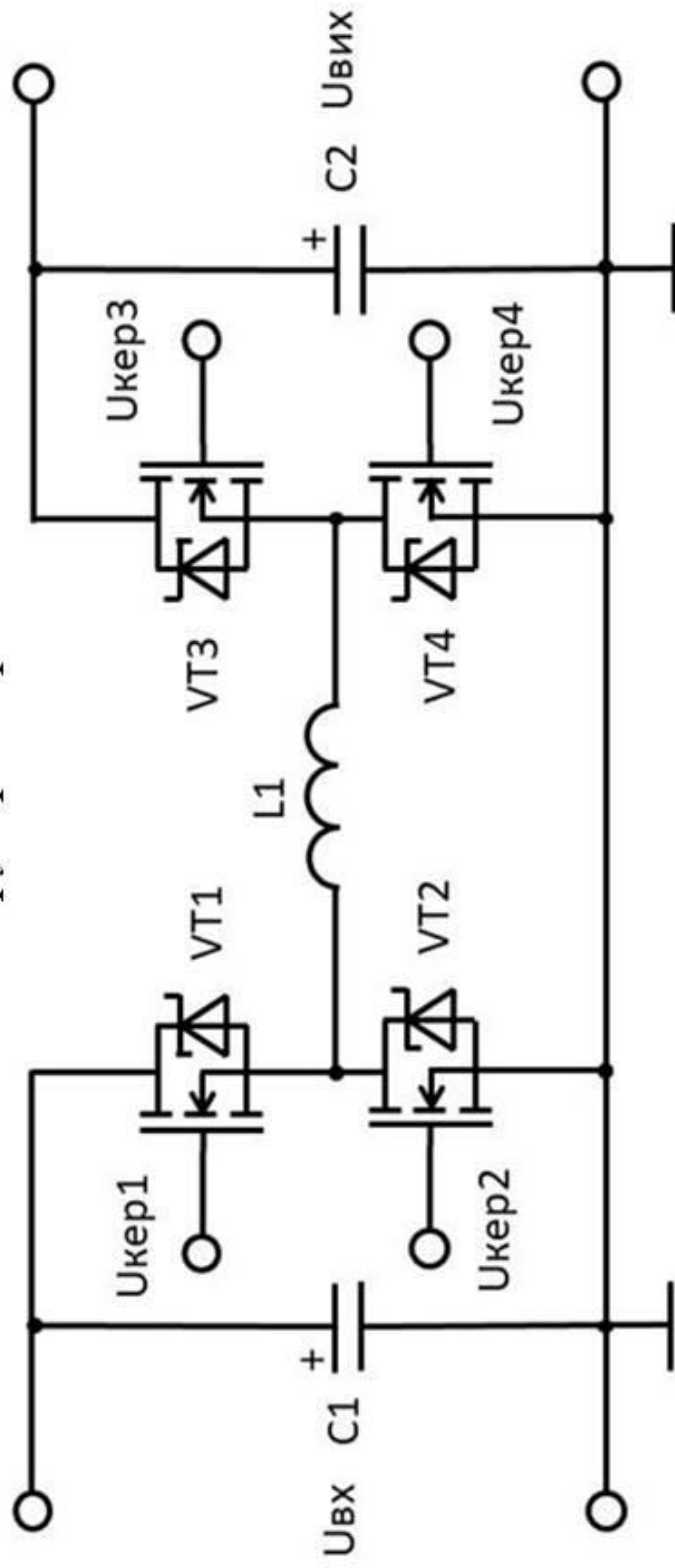


Рисунок 3 Схема електрична принципова Н-мостового синхронного понижуючого-підвищуючого перетворювача постійної напруги

Структурна схема оптимізатора сонячної панелі

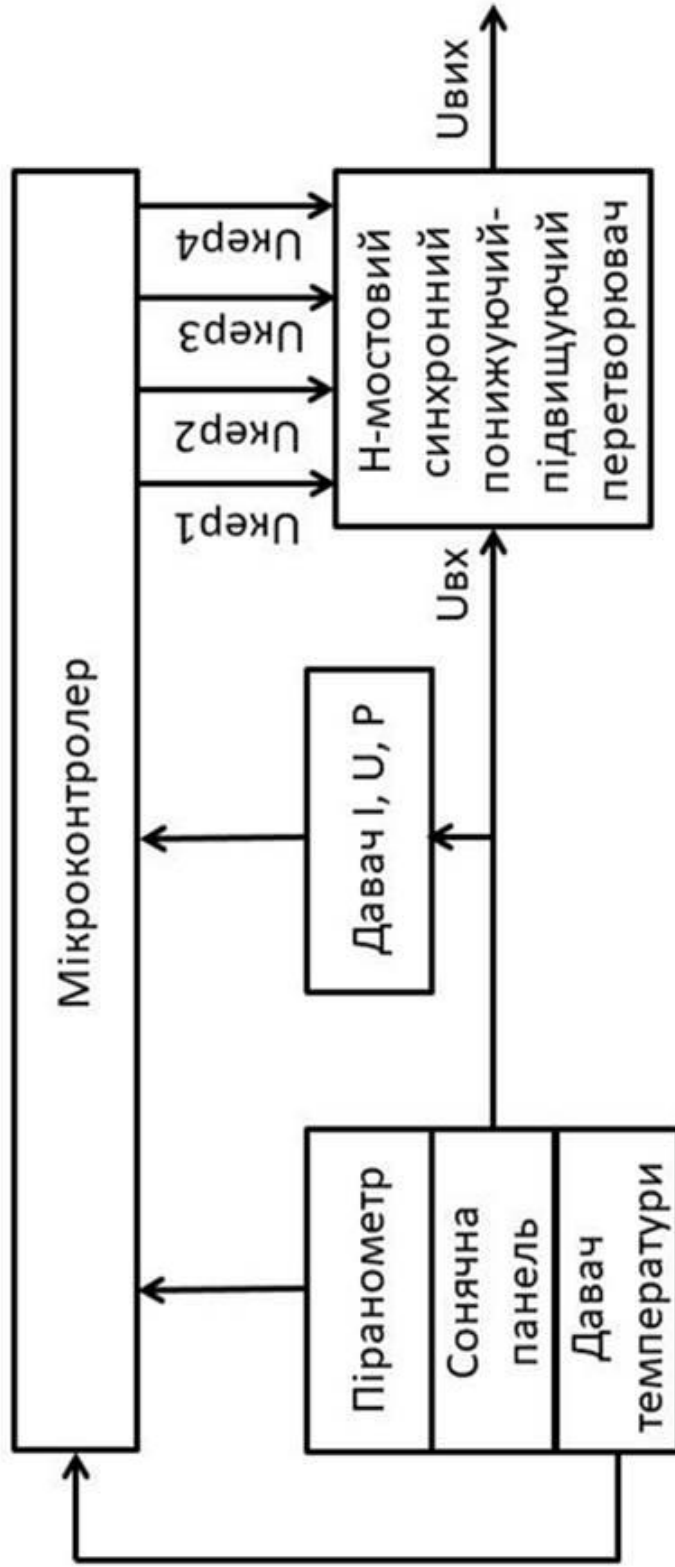


Рисунок 4 – Структурна схема оптимізатора сонячної панелі

Блок схема алгоритму зворотного пошуку

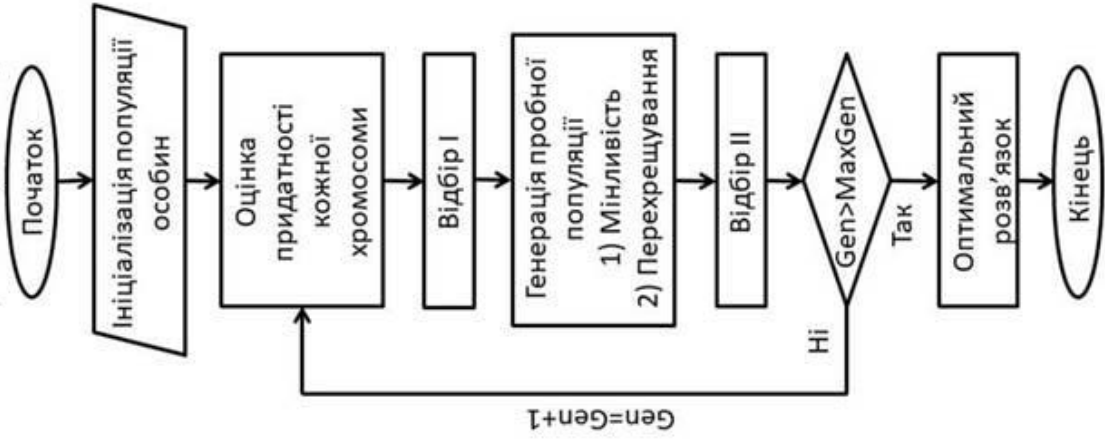


Рисунок 5 - Блок схема алгоритму зворотного пошуку

Імітаційна модель двох послідовно з'єднаних сонячних панелей із різними рівнями випромінювання світла $G1=1000 \text{ Вт/М}^2$ та $G2=500 \text{ Вт/М}^2$ ⁹

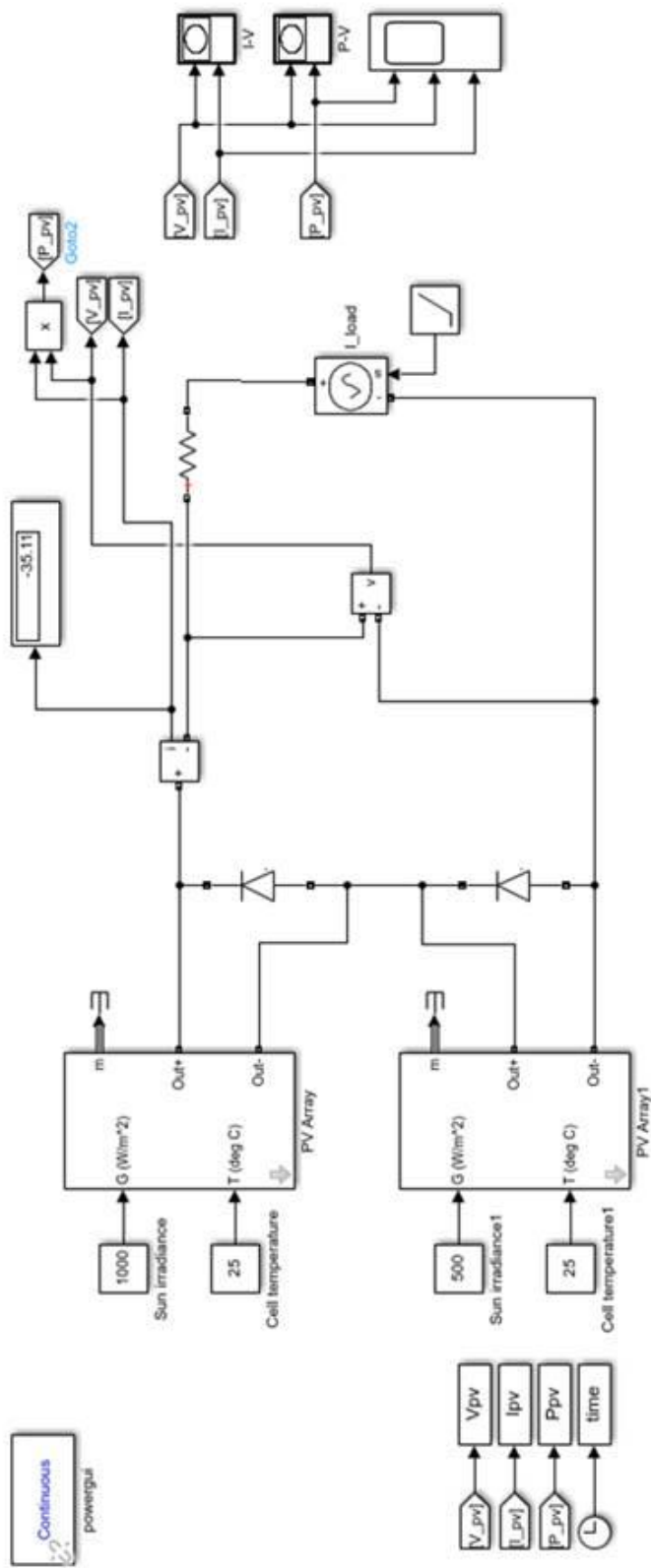
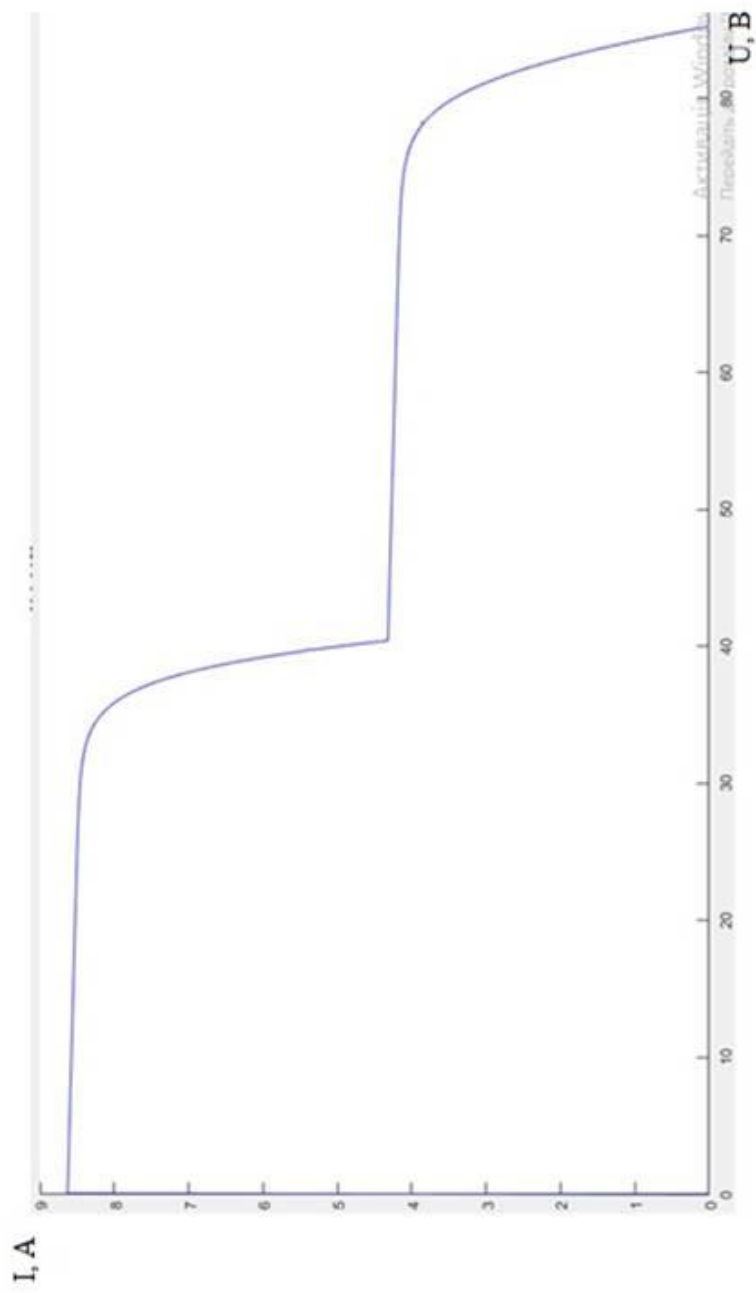


Рисунок 6 - Імітаційна модель двох послідовно з'єднаних сонячних панелей із різними рівнями випромінювання світла $G1=1000 \text{ Вт/М}^2$ та $G2=500 \text{ Вт/М}^2$

Вольт-амперна характеристика двох послідовно з'єднаних сонячних панелей CL-P72295 китайської компанії ABISOLAR із різними рівнями випромінювання світла

10



Вольт-ватна характеристика двох послідовно з'єднаних сонячних панелей CL-P72295 китайської компанії ABISOLAR із різними

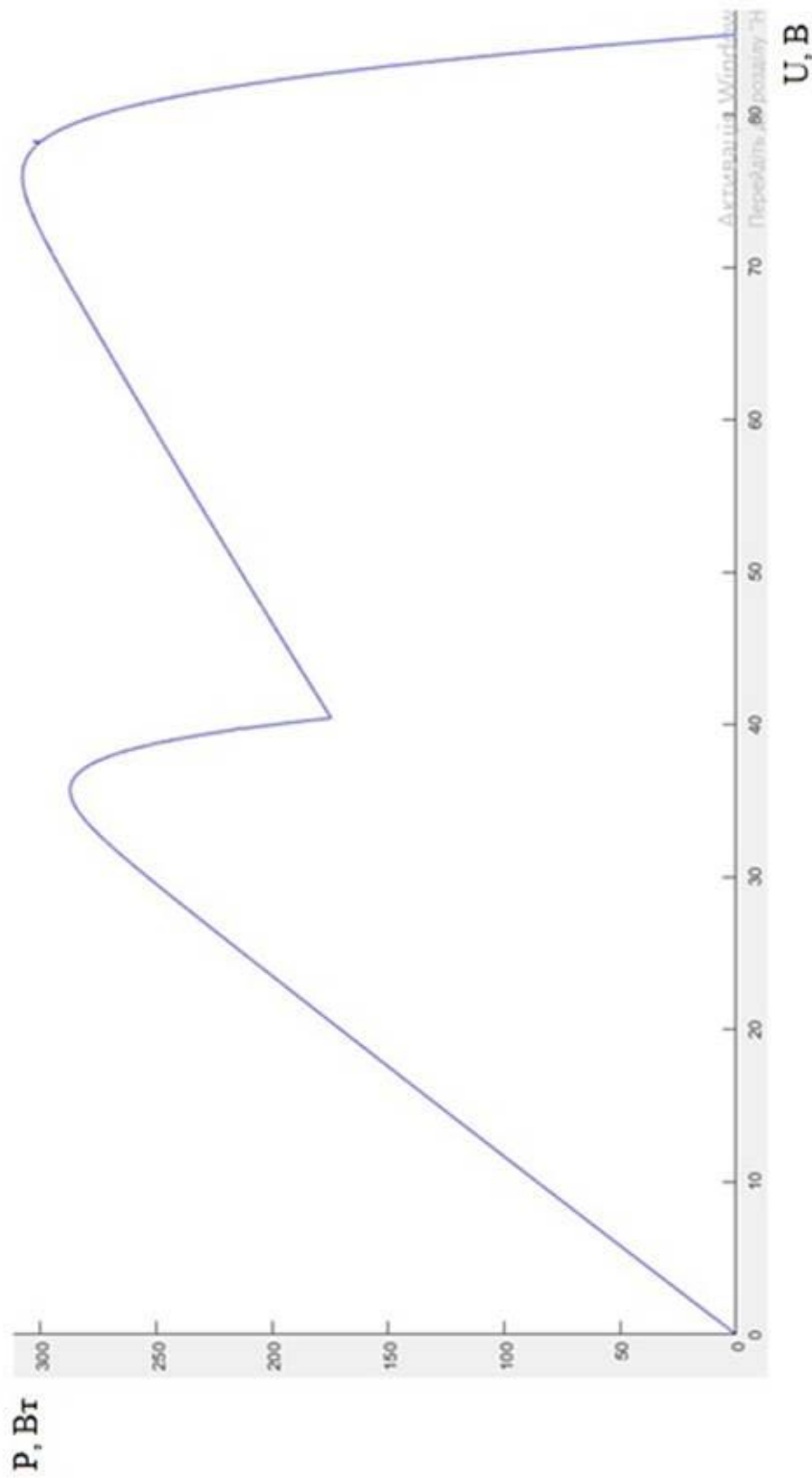


Рисунок 8 – Вольт-ватна характеристика двох послідовно з'єднаних сонячних панелей CL-P72295 китайської компанії ABISOLAR із різними рівнями випромінювання світла

Імітаційна модель оптимізатора сонячної панелі

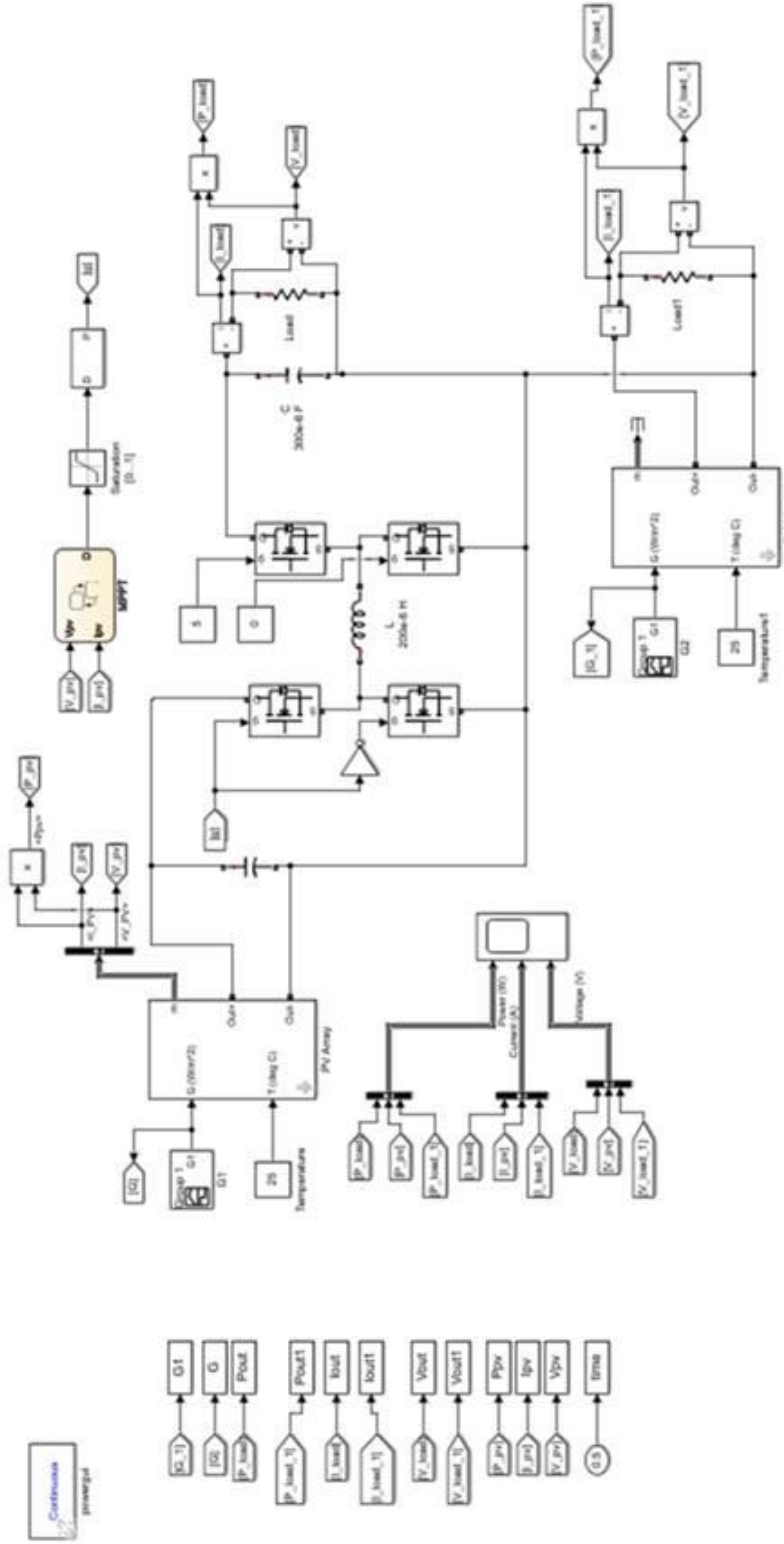


Рисунок 9 – Імітаційна модель оптимізатора сонячної панелі

Імітаційна модель сонячної панелі

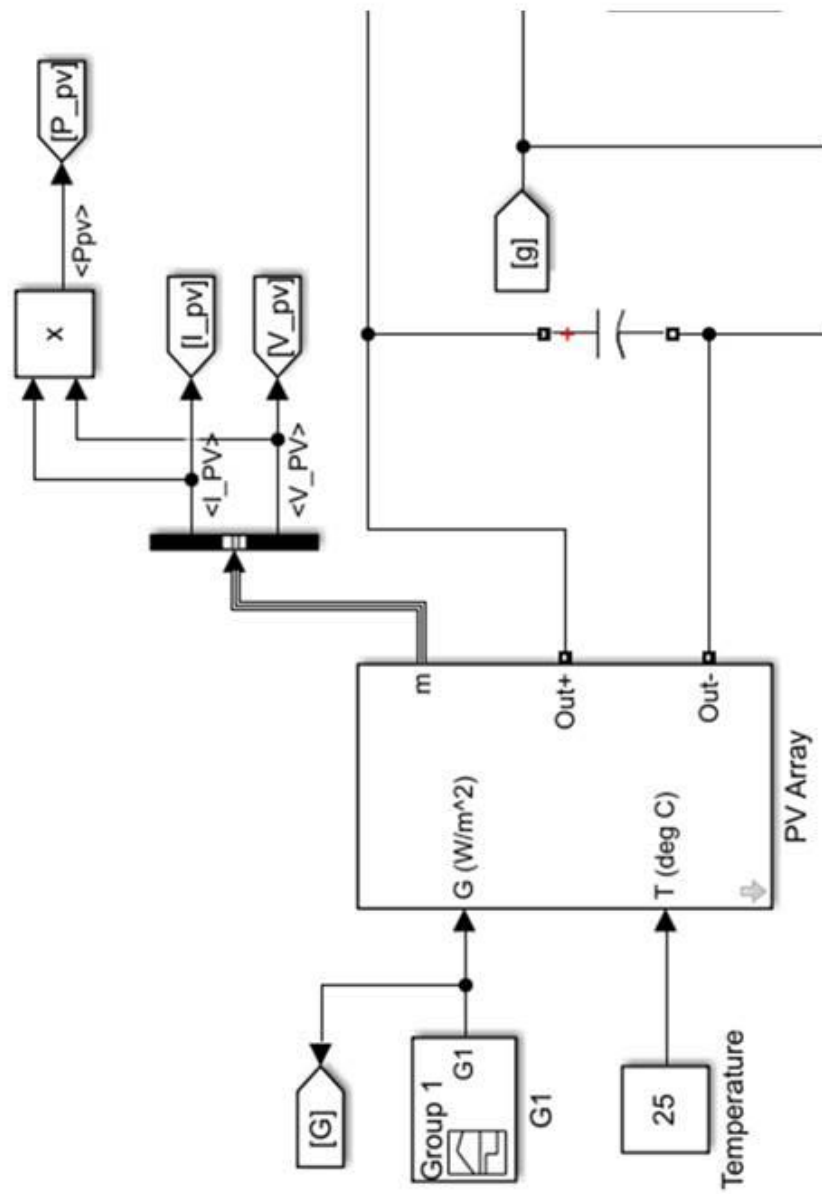
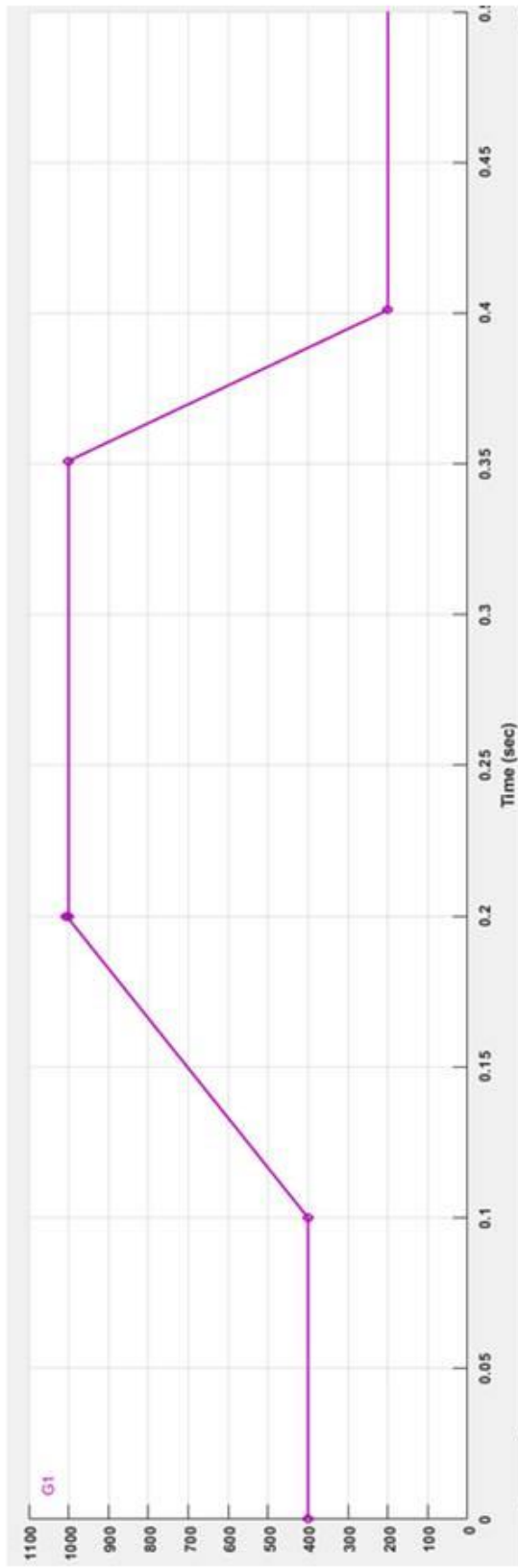
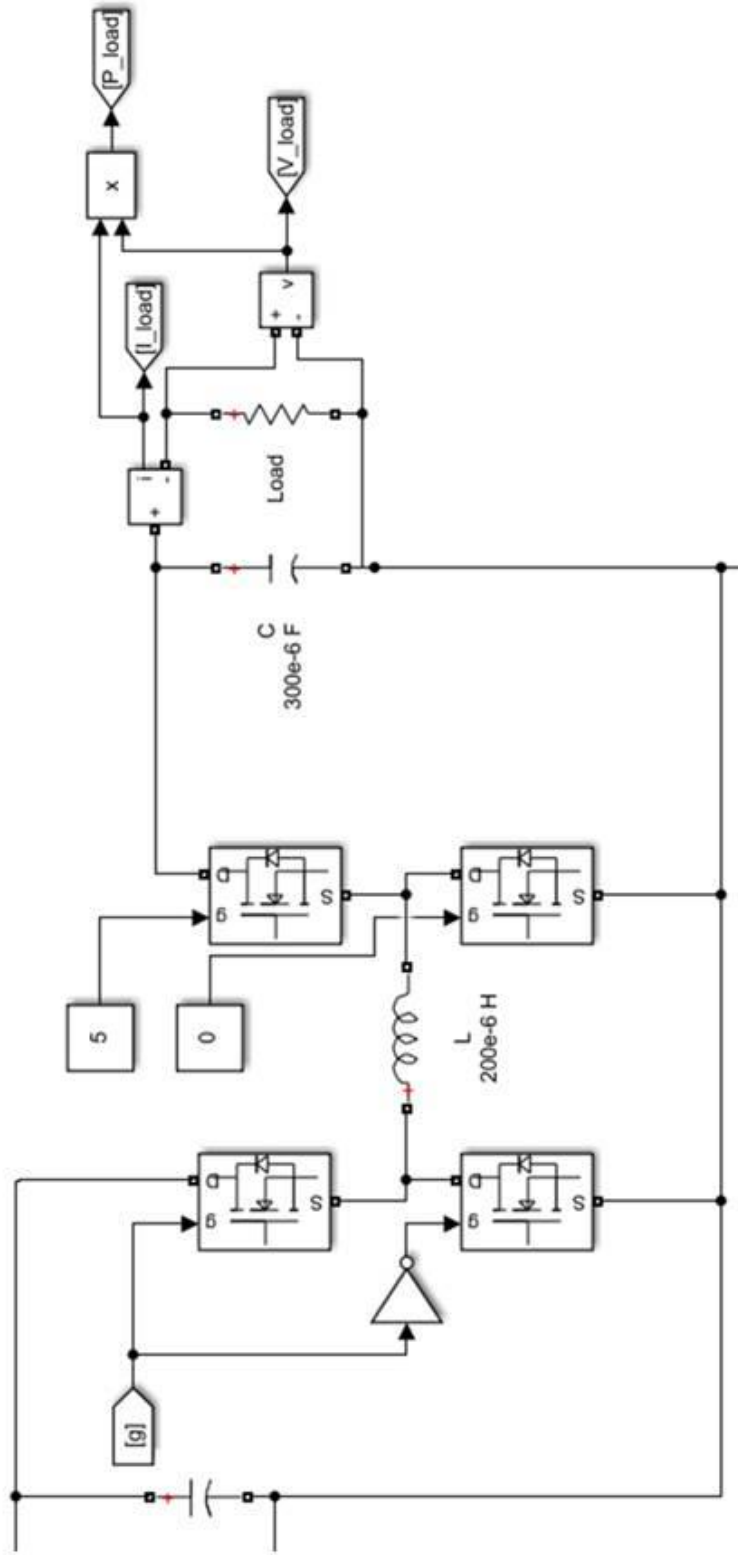


Рисунок 10 – Імітаційна модель сонячної панелі

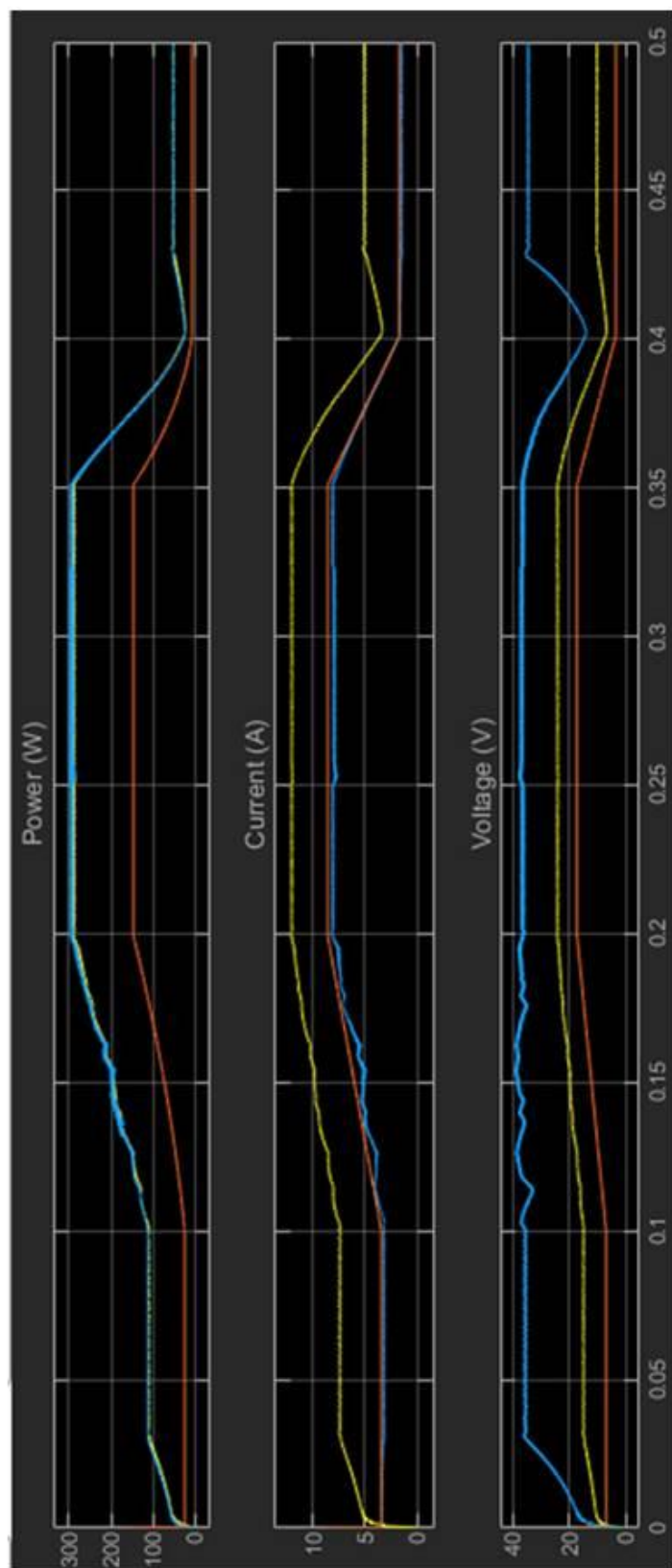
Змінний у часі рівень випромінювання світла G1



Імітаційна модель Н-мостового синхронного понижуючого-підвищуючого перетворювача постійної напруги



Графіки напруги, струму та потужності першої та другої сонячних панелей



**Експериментальна установка дослідження методу керування
оптимізатора сонячної панелі**



1. В результаті виконання досліджень розроблено високоефективний та високоточний метод відслідковування точки максимальної потужності кожної сонячної панелі, що забезпечують максимальний світловий потік та роботу сонячної панелі в точці максимальної потужності при різних погодних умовах.
2. Для реалізації методу керування оптимізатором сонячної панелі використано нові методи теорії дробового числення та нелінійної динаміки, що дають можливість підвищення точності і адекватності методів та моделей.
3. Запропонована концепція ефективного відбору енергії від кожної сонячної панелі ґрунтується на передумові, що кожний ФМ в конкретний момент часу має унікальні параметри точки максимальної потужності – відповідне значення напруги і струму, за яких модуль генерує максимально доступну потужність.
4. На основі передумови, що в стрінгу всі сонячні панелі не можуть працювати в точці максимальної потужності, якщо його сформовано прямим електричним з'єднанням сонячних панелей, запропоновано метод керування оптимізатором сонячної панелі, який дозволяє кожній сонячній панелі у стрінгу індивідуально генерувати максимальну доступну потужність, тим самим забезпечує одержання більше енергії з системи в цілому.

ДЯКУЮ ЗА УВАГУ!

Anti-Plagiarism v-15.257**Максимальне співпадіння з одним документом 1.0%****Словники перевірки: en_US, ru_RU, ua_UA. Помилки в документах: 10%**

ID: 109310 Назва: МКР Метод керування оптимізатором сонячної панелі Додано в БД: 2022-12-10 Автора: Гребіщук А. Д. Керівник: Мартинюк В.В., д.т.н., професор Консультанти: Опоненти:	Документ		Сумарний збіг по Базі Даних	
	Символи	Лексеми	Символи	Лексеми
	69128	507	707 (1%)	10 (2%)

Джерело плагіату

ID	Опис	Наявність плагіату в документі	
		Символи	Лексеми

Ім'я користувача:
Кафедра АКІТІТК

ID перевірки:
1013235234

Дата перевірки:
07.12.2022 23:22:15 EET

Тип перевірки:
Doc vs Internet

Дата звіту:
07.12.2022 23:33:46 EET

ID користувача:
100005862

Назва документа: Гребінчук_антиплагіат

Кількість сторінок: 77 Кількість слів: 10212 Кількість символів: 76414 Розмір файлу: 8.82 MB ID файлу: 1012995040

Виявлено модифікації тексту (можуть впливати на відсоток схожості)

0.51%
Схожість

Найбільша схожість: 0.24% з Інтернет-джерелом (<https://ibpdlyakotla.com/ua/g7177960-inventory-mppt-kontrollerom>)

0.51% Джерела з Інтернету

8

Сторінка 79

Пошук збігів з Бібліотекою не проводився

0% Цитат

Не знайдено жодних цитат

Не знайдено жодних посилань

0%
Вилучень

Немає вилучених джерел

Модифікації

Виявлено модифікації тексту. Детальна інформація доступна в онлайн-звіті.

Замінені символи

97

Підозріле форматування

13
сторінок

РЕЦЕНЗІЯ

на кваліфікаційну роботу магістрантки Аліни ГРЕБІНЧУК
на тему: "Метод керування оптимізатором сонячної панелі"

Кваліфікаційну роботу присвячено розробці методу керування оптимізатором сонячної панелі. В ній на основі математичної моделі сонячної панелі та схеми електричної принципова Н-мостового синхронного понижуючого-підвищуючого перетворювача постійної напруги розроблено метод керування оптимізатором сонячної панелі, який відрізняється від існуючих методів тим, що здійснюється початковий розрахунок паралельного опору R_{sh} та послідовного опору R_s сонячної панелі, використовуючи параметри сонячної панелі, які надає виробник сонячної панелі. Розроблений метод керування оптимізатором сонячної панелі забезпечує підвищення енергетичної ефективності технологічного процесу виробництва електричної енергії.

Особливістю розробленого методу керування оптимізатором сонячної панелі є розрахунок струму в точці максимальної потужності I_{mp} та напруги в точці максимальної потужності U_{mp} , при вимірних значеннях інтенсивності сонячного випромінювання та температури сонячної панелі.

В якості оптимізатора сонячної панелі використано перетворювач постійної напруги сонячної панелі у постійну напругу навантаження.

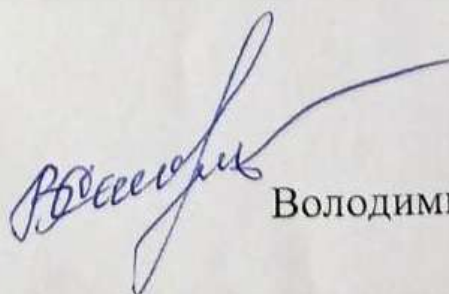
Всі розділи кваліфікаційної роботи виконанні сумлінно та на високому науковому рівні із дотриманням вимог до кваліфікаційних робіт магістрів. Результати досліджень представлені у вигляді статті у фаховому журналі «Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах» №4 2022р.

До недоліків роботи можна віднести неповний аналіз впливу зовнішніх параметрів на оптимізатор сонячної панелі, але вказаний недолік не зменшує наукового рівня кваліфікаційної роботи.

Вважаю, що кваліфікаційна робота магістрантки Аліни ГРЕБІНЧУК заслуговує оцінки «відмінно», а магістрантка заслуговує присвоєння кваліфікації магістра з автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій.

Рецензент:

к.т.н., професор, завідувач
кафедри фізики і електротехніки



Володимир КОСЕНКОВ

Завідувачу кафедри АКІТ
д-ру техн.наук, проф. Мартинюку В.В.

Гребінчук Аліни Дмитрівни

ПІБ здобувача вищої освіти

ФІТ, 2 курсу, групи АКІТм-21-1

ЗАЯВА

З правилами чинного Положення «Про дотримання академічної доброчесності в Хмельницькому національному університеті» від 26.09.2022 (зі змінами від 26.11.2022), згідно з яким виявлення плагіату є підставою для відмови в допуску кваліфікаційної роботи до захисту та застосування заходів дисциплінарної та академічної відповідальності, ознайомлений (а). Про використання програмно-технічних засобів для перевірки кваліфікаційних робіт здобувачів вищої освіти на наявність плагіату ознайомлений(а) та надаю свою згоду на обробку та збереження університетом моєї роботи в інституційному репозитарії університету.

Також надаю університету право на передачу моєї роботи для обробки та збереження в базах даних програмно-технічних засобів (Unicheck та Anti-Plagiarism) та використання роботи для виявлення плагіату в інших роботах, які перевіряються програмно-технічними засобами та користувачами, що мають доступ до цих програмно-технічних засобів, виключно в обмежених цілях для виявлення плагіату в текстах робіт.

Робота для перевірки університетом надається в друкованому та електронному варіанті. Електронна версія моєї роботи збігається (ідентична) з друкованою.

08.12.2022

дата



підпис

РІШЕННЯ КАФЕДРИ

АВТОМАТИЗАЦІЯ ТА КОМП'ЮТЕРНО-ІНТЕГРОВАНІ ТЕХНОЛОГІЇ

ПРО ДОПУСК КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ ДО ЗАХИСТУ

Підтверджуємо ознайомлення з результатом звіту подібності щодо роботи, генерованого системою виявлення текстових збігів/ідентичності/схожості:

Назва: Метод керування оптимізатором сонячної панелі

Автор: Гребінчук Аліна Дмитрівна

Спеціальність: 151 Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології

Освітня програма: Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології

Науковий керівник: д.т.н, проф. Мартинюк Валерій Володимирович

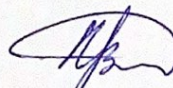
Після аналізу звіту подібності зроблено такий висновок:

№	Висновок	Позначка про відповідність
1	Запозичення, виявлені в роботі, є законними і не є плагіатом (далі – зазначаються підстави віднесення запозичень до правомірних). Робота приймається до захисту.	<u>Відповідає</u>
2	Виявлені запозичення не є плагіатом, розміщені в розділах, які не описують безпосередньо авторське дослідження, але кількість цитат перевищує обсяг, виправданий поставленою метою роботи (далі – зазначаються детальні та аргументовані підстави віднесення запозичень до правомірних). Робота приймається до захисту, але має бути відкоригована. Відкоригований варіант має бути поданий на кафедру за 2 дні до захисту, разом із заявою щодо самостійності виконання письмової роботи та ідентичності друкованої та електронної версії роботи	
3	Виявлені запозичення не є плагіатом, але частково розміщені в розділах, які описують безпосередньо авторське дослідження, а кількість цитат перевищує обсяг, виправданий поставленою метою роботи. В зв'язку з цим мета роботи та поставлені завдання не були досягнені. Робота може бути допущена до захисту (наступного року) після того як буде відкоригована та допрацьована і успішно пройде повторну перевірку на академічний плагіат.	
4	Робота містить навмисні текстові спотворення, передбачувані спроби укриття запозичень або інші прояви академічного плагіату. Робота містить фабрикацію або фальсифікацію даних. Робота не допускається до захисту.	
5	Інше:	

Підтвердження: Запозичення у розмірі 0,51%, виявлені в роботі відповідають тексту стандартних бланків та списку літератури, решта запозичень є випадковими, або на них є посилання, тому ці запозичення не є плагіатом, бо вони не стосуються наукової новизни і практичної значущості роботи.

08.12.2022р.

Науковий керівник роботи:



Валерій МАРТИНЮК

Зав. каф. АКІТ



Валерій МАРТИНЮК