

ХМЕЛЬНИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет програмування та комп'ютерних і телекомунікаційних систем
Кафедра автоматизації, комп'ютерно-інтегрованих технологій та телекомунікації

ДИПЛОМНА РОБОТА

Другий (Магістерський)

Освітній рівень

Галузь знань 17 Електроніка та телекомунікації

Шифр і назва спеціальності

Спеціальність 172 Телекомунікації та радіотехніка

Шифр і назва спеціальності

на тему «Метод моніторингу сонячних панелей»

ДРТР.2015044.02.18.ПЗ

Виконав: студент 2 курсу, група ТР_М-19-1



підпис

Т.О. Новак

Ініціали, прізвище

Керівник: д-р техн, наук, проф.



підпис

В.В. Мартинюк

Ініціали, прізвище

До захисту допускаю:

Зав. кафедри: д-р техн. наук, проф.



підпис

В.В. Мартинюк

Ініціали, прізвище

03 12 2020 р.

Хмельницький, 2020

Хмельницький національний університет

Факультет програмування та комп'ютерних і телекомунікаційних систем
Кафедра автоматизації, комп'ютерно-інтегрованих технологій і
телекомунікацій

Освітній рівень другий (магістерський)

Галузь знань 17 – Електроніка та телекомунікації

Спеціальність 172 – Телекомунікації та радіотехніка

Освітня-професійна програма Телекомунікації та радіотехніка

ЗАТВЕРДЖУЮ

Зав. кафедрою

AKIT:TK
Мартинюк В.В.

« 1 » 09 2020р.

ЗАВДАННЯ НА ДИПЛОМНУ РОБОТУ

Новак Тетяні Олександрівні

1 Тема роботи: Метод моніторингу сонячних панелей

керівник роботи Мартинюк Валерій Володимирович, д.т.н, професор.

Затверджено наказом по університету від «1» вересня 2020р. № 118.

2 Строк подання студентом роботи на кафедру: 02.12.2020р.

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

Мета роботи: розробка методу моніторингу сонячних панелей.

Об'єкт дослідження: процес моніторингу сонячних панелей.

Предмет дослідження: удосконалення методу моніторингу сонячних панелей.

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

Вступ. Огляд літературних джерел та патентних даних. Удосконалений метод моніторингу сонячних панелей. Імітаційна модель та визначення параметрів сонячної панелі. Експериментальне дослідження методу моніторингу сонячних панелей. Висновки.

Завдання отримав _____

Науковий керівник _____

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ п/п	Назва етапів (розділів) дипломної роботи	Строк виконання етапів дипломної роботи	Примітка
1	Вступ	10.09.2020р.	Виконано
2	Огляд літературних джерел та патентних даних	25.09.2020р.	Виконано
3	Удосконалений метод моніторингу сонячних панелей	15.10.2020р.	Виконано
4	Імітаційна модель та визначення параметрів сонячної панелі	30.10.2020р.	Виконано
5	Експериментальне дослідження методу моніторингу сонячних панелей	10.11.2020р.	Виконано
6	Висновки	15.11.2020р.	Виконано
6	Оформлення пояснювальної записки до ДР	20.11.2020р.	Виконано
7	Оформлення презентаційних матеріалів	1.12.2020р.	Виконано

Студент

 Нових Т.О.

Підпис Ініціали, прізвище

Керівник роботи

 Мергенюк В.В.

Підпис Ініціали, прізвище

Зміст

Вступ.....	5
1 Огляд літературних джерел та патентних даних.....	9
1.1 Структура і класифікація сонячних електростанцій.....	9
1.2 Типова система моніторингу параметрів режиму роботи сонячної панелі.....	11
1.3 Математична модель фотоелектричного перетворювача.....	15
Висновки до першого розділу.....	26
2 Удосконалений метод моніторингу сонячних панелей.....	27
2.1 Достовірність моніторингу сонячних панелей.....	27
2.2 Загальна структурна схема системи моніторингу сонячних панелей.....	28
2.3 Підвищення достовірності удосконаленого методу моніторингу сонячних панелей.....	33
Висновки до другого розділу.....	38
3 Імітаційна модель та визначення параметрів сонячної панелі.....	40
3.1 Методика визначення параметрів сонячної панелі.....	40
3.2 Імітаційна модель сонячної панелі в середовищі Simulink.....	46
Висновки до третього розділу.....	52
4 Експериментальне дослідження методу моніторингу сонячних панелей.....	54
4.1. Загальна структура схема системи моніторингу сонячних панелей у реальному масштабі часу.....	54
4.2 Розробка алгоритму та програмного забезпечення для системи моніторингу сонячних панелей у реальному масштабі часу.....	63
Висновки до четвертого розділу.....	68
ВИСНОВКИ.....	70
Перелік посилань.....	72
Додаток А Стаття у фаховому журналі.....	79
Додаток Б Презентація.....	86

ВСТУП

Актуальність теми. Розвиток відновлювальних джерел енергії в Україні сприяє вирішенню ряду екологічних, енергетичних, соціальних та економічних проблем, що мають важливе суспільне значення [1-3]. Основними засадами державної політики у сфері альтернативних джерел енергії, відповідно до закону України «Про альтернативні джерела енергії», є нарощування обсягів виробництва та споживання енергії, виробленої відповідними джерелами, з метою економного використання традиційних паливно-енергетичних ресурсів.

В умовах збільшення частки таких електростанцій в енергобалансі об'єднаної енергосистеми України набувають особливої актуальності задачі оптимального керування виробництвом електроенергії відновлювальних джерел енергії, які входять до складу локальних електричних систем, а також моніторинг та контроль сонячних панелей у реальному масштабі часу [1-6].

Актуальність роботи обумовлена проблемою моніторингу кожної панелі сонячної електростанції окремо, а не в сукупності 20 панелей у стрінгу, як це здійснюється в сучасних інверторах, які передають дані про напругу, струм та потужність у цього стрінгу в цілому.

Якщо у стрінгу хоча б одна із панелей суттєво відрізняється за своїми технічними характеристиками, наприклад, має вищий внутрішній активний опір за інших панелей у стрінгу, то загальний сумарний струм у цього стрінгу буде суттєво меншим, а це, у свою чергу, призведе до зменшення виробленої електричної потужності. Але в цьому випадку інвертор буде показувати зменшення потужності цього стрінгу, а щоб визначити, яка конкретно панель має погіршені параметри, потрібно демонтувати всі панелі у стрінгу і перевірити їх працездатність окремо.

Також, ще одними суттєвим недоліком існуючих систем моніторингу та контролю сонячних панелей є неможливість вимірювати температуру як кожної

панелі окремо, так і стрінгу, яка суттєво впливає на коефіцієнт корисної дії сонячних панелей.

Метою роботи є підвищення ефективності систем моніторингу сонячних панелей шляхом розробки алгоритму взаємодії їх мікроконтролерної системи керування та комп'ютера в реальному масштабі часу.

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

- розробити структурну схему системи моніторингу сонячних панелей у реальному масштабі часу;

- розробити алгоритм взаємодії мікропроцесорної системи керування системи моніторингу сонячних панелей з комп'ютером у реальному масштабі часу;

- удосконалити метод моніторингу сонячних панелей.

Об'єктом дослідження є процес моніторингу сонячних панелей.

Предметом дослідження є удосконалення методу моніторингу сонячних панелей.

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

Наукова новизна отриманих результатів:

1. Удосконалено метод моніторингу сонячних панелей, який відрізняється від існуючих методів тим, що запропоновано алгоритм взаємодії мікропроцесорної системи керування засобів моніторингу сонячних панелей з комп'ютером у реальному масштабі часу, який забезпечує підвищення енергетичної ефективності технологічного процесу виробництва електричної енергії.

Практична значимість отриманих результатів:

У роботі розроблена система моніторингу сонячних панелей у реальному масштабі часу на основі використання вимірювальних датчиків. Така вбудована

система віддаленого моніторингу підключається через Wi-Fi та дозволяє відслідковувати покази генерації енергії в реальному масштабі часу з будь-якої точки планети за допомогою комп'ютера або смартфона, які під'єднані до глобальної мережі Інтернет. Використання такої системи дозволяє підвищити точність вимірювання основних параметрів сонячних панелей, а також зменшити час виявлення панелей із погіршеними параметрами та характеристиками.

Апробація результатів дослідження: Результати досліджень представлені у вигляді статті у фаховому журналі «Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах» №1 2020р.

Дипломна 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: 21 рисунок та 0 таблиць, список використаних джерел вміщує 50 найменувань.

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

У першому розділі магістерської роботи проаналізовано особливості сонячних електростанцій та типової системи моніторингу параметрів режиму роботи сонячної панелі. Проаналізовано відому математичну модель фотоелектричного перетворювача з метою моніторингу його параметрів.

У другому розділі розглянуто удосконалення методу моніторингу сонячних панелей за рахунок врахування вихідного струму сонячної панелі I , вихідної напруги сонячної панелі U та вихідної потужності сонячної панелі P , а також зміну цих параметрів сонячної панелі внаслідок зміни освітленості та температури сонячної панелі $I(G, T)$, $U(G, T)$ та $P(G, T)$.

У третьому розділі магістерської роботи розроблено процес моніторингу

сонячних панелей, який базується на використанні значення струму, напруги та потужності сонячної панелі у трьох точках її вольт-амперної характеристики.

У четвертому розділі магістерської роботи розроблена загальна структурна схема системи моніторингу сонячних панелей у реальному масштабі часу, яка базується на схемі підключення мікроконтролера WeMos D1 до розумної технології OpenHab. У загальних висновках по магістерській роботі висвітлені основні результати досліджень, які отримані у дипломній роботі магістра.

1. Огляд літературних джерел та патентних даних

1.1. Структура і класифікація сонячних електростанцій

В залежності від джерела енергії, сучасні електростанції поділяються на такі види: теплові, атомні, вітряні, гідроелектростанції, тощо. Системи електроживлення, які базуються на перетворенні сонячної енергії, називаються сонячними електростанціями.

Базова структура сонячної електростанції включає в себе чотири основні компоненти: сонячні панелі; контролер заряду; інвертор; акумуляторний блок. Дані компоненти необхідні для безперебійного функціонування сонячної електростанції.

Сукупність сонячних панелей виступає в ролі ключового елемента в системі трансформації сонячного випромінювання в електроенергію. З'єднані разом, фотоелектричні модулі формують масив, розмір якого визначає кількість енергії, що виробляється системою.

Контролер заряду – один з принципово важливих приладів, що входять до переліку складових систем сонячної електростанції. Він регулює напругу, що генерується масивом сонячних батарей і контролює правильність та ефективність заряду акумуляторної батареї – запобігає підвищеному або заниженому рівню заряду. Контролер заряду є необхідним пристроєм у сонячних електростанціях з системою накопичення енергії.

Акумуляторна батарея призначена для накопичення та зберігання енергії, що виробляється сонячною станцією. Як правило, використовуються спеціалізовані акумуляторні батареї, що мають багаторічний термін експлуатації, а також розгортаються спеціально для автономних систем [1-7].

Для перетворення постійного струму в змінний використовується інвертор. У більшості випадків необхідно використовувати інвертори з синусоїдальною формою вихідного сигналу, чистий синус. Для електропостачання будинку

рекомендується використовувати інвертор з показником потужності близько 2-4 кВт.

Автономна сонячна електростанція не під'єднана до центральної електромережі і використовується тоді, коли фізично немає можливості підключитись до ліній електропередач або дана процедура економічно не вигідна.

На рисунку 1.1 зображена узагальнена структурна схема автономної сонячної електростанції.

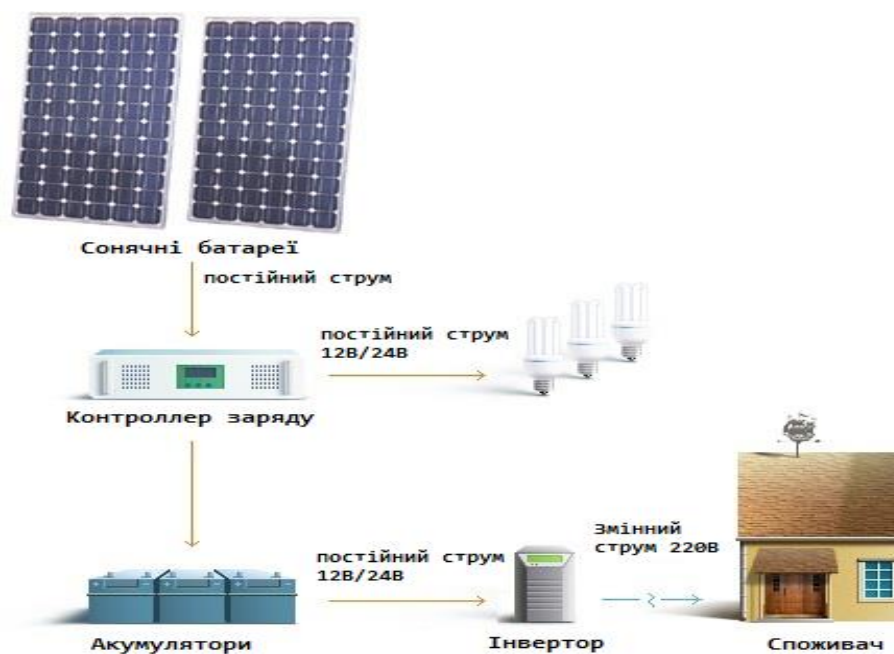


Рисунок 1.1 – Структурна схема автономної сонячної електростанції

Для такої системи вся електроенергія виробляється сонячними батареями, а вночі і похмурої днини відбувається розряд акумуляторів. Передбачається, що потужність сонячних батарей достатня для живлення, навантаження і забезпечення заряду акумуляторів. Застосування даного типу сонячних електростанцій є виправданим при невеликих потужностях споживання.

Для збільшення коефіцієнту корисної дії і більш ефективного використання сонячної електростанції повинен бути розроблений алгоритм роботи, який дозволить підвищити ефективність роботи системи. Для цього слід

розглянути наступні аспекти, які пов'язані з роботою системи: навантаження в різні моменти часу; потужність, яку виробляє система в даний момент; потужність, яку можна отримати від акумуляторної батареї; загальна вартість електроенергії.

Мережева електростанція (із підключенням до зовнішньої електромережі) складається всього з двох основних компонентів: мережевого інвертора і масиву сонячних панелей.

Мережевий інвертор призначений для прямого перетворення постійного струму від сонячних панелей в змінний струм частотою 50 Гц і напругою 220В. Інвертор підключається паралельно існуючій мережі 220В, а вироблена ним електроенергія живить споживачів у першу чергу. Зовнішня мережа покриває недостачу електроенергії, що виробляється сонячними панелями.

Основною перевагою гібридних мережевих сонячних станцій є те, що вони використовують накопичувачі електроенергії (акумуляторні батареї) тільки для забезпечення безперебійного електропостачання при відключенні зовнішньої мережі. Цей факт знижує витрати споживача.

1.2 Типова система моніторингу параметрів режиму роботи сонячної панелі

Безвідмовна робота сонячних панелей і всіх елементів сонячної електростанції є необхідною умовою для ефективного виробництва електроенергії і прибутковості інвестицій у сонячну електростанцію. Щоб гарантувати тривалу безаварійну роботу, потрібен періодичний аудит (діагностика, рекомендації щодо усунення недоліків) усіх елементів сонячної електростанції.

Виявлення несправних та знаходження неефективних сонячних панелей зі зниженим коефіцієнтом корисної дії впливає на рівень генерації електроенергії в

процесі експлуатації сонячної станції. При послідовному підключенні сонячних панелей несправність одного з елементів може привести до часткової або повної втрати потужності всієї сонячної електростанції. Крім того, у зв'язку з тим, що сонячні панелі складаються з величезної кількості напівпровідникових елементів, виділення тепла в несправному елементі може привести до руйнування сусідніх елементів, тобто проблема буде розростатися з плином часу. Тому необхідно вчасно виявляти несправні сонячні панелі, що дозволить зробити їх швидко заміну. Це дозволить отримати максимальний термін експлуатації системи і максимальну ефективність.

Для вчасного виявлення несправних сонячних панелей необхідно проводити неперервний моніторинг ефективності роботи обладнання, який дозволяє своєчасно виявити порушення в роботі сонячних панелей, а також контролювати доступ до окремих модулів.

Сонячна установка складається з модулів, які реєструють сигнали датчиків струму, напруги й температури окремих сонячних панелей, а також датчиків швидкості вітру, положення Сонця, дверних датчиків або датчиків несанкціонованого доступу до мережевих інверторів.

Системні модулі з'єднані з локальним контролером, який, у свою чергу, пов'язаний з контролером більш високого рівня по шині Modbus RS485 або CAN. Модульна побудова забезпечує високу гнучкість конфігурації і розширення системи. Завдяки цьому модулі підходять для застосування як в солярних парках, так і в невеликих електростанціях.

Також моніторинг важливо здійснювати, оскільки протягом дня може бути різке падіння потужності, яке може бути обумовлене різними факторами, такими, як: затінення сонячної панелі певними предметами або забруднення поверхні сонячної панелі(листя, сніг, пил і т.д.).

Аналізуючи сучасні системи моніторингу сонячних панелей, виявляють певні недоліки, а саме: неможливість вимірювати параметри кожної сонячної

панелі окремо, оскільки більшість існуючих систем підключаються до інвертора та вимірюють основні характеристики всього стрінгу, велика вартість такої системи, а також неможливість вимірювати температуру.

Вимірювання напруги, струму та потужності в сучасних моніторингових системах роботи сонячних панелей важливо здійснювати в режимі квазі реального часу, оскільки це дозволяє контролювати роботу модулів, що входять до складу сонячної панелі, а також є найбільш точним способом виявлення несправностей у роботі системи [8]. Типова система моніторингу параметрів режиму роботи сонячної панелі представлена на рисунку 1.2.

Напруга постійного струму вимірюється за допомогою схеми поділу напруги, яка змушує напругу падати до вимірюваного діапазону. Багато сонячного випромінювання, поглиненого модулем сонячної панелі, не перетворюється в електричну енергію, але нагріває модуль [9-11], що призводить до збільшення струму короткого замикання приблизно на 0,1% на 1 °C і зменшення напруги приблизно на 2 мВ на 1 °C, отже, температура є важливим параметром для вимірювання, щоб передбачити ефективність системи сонячних панелей.

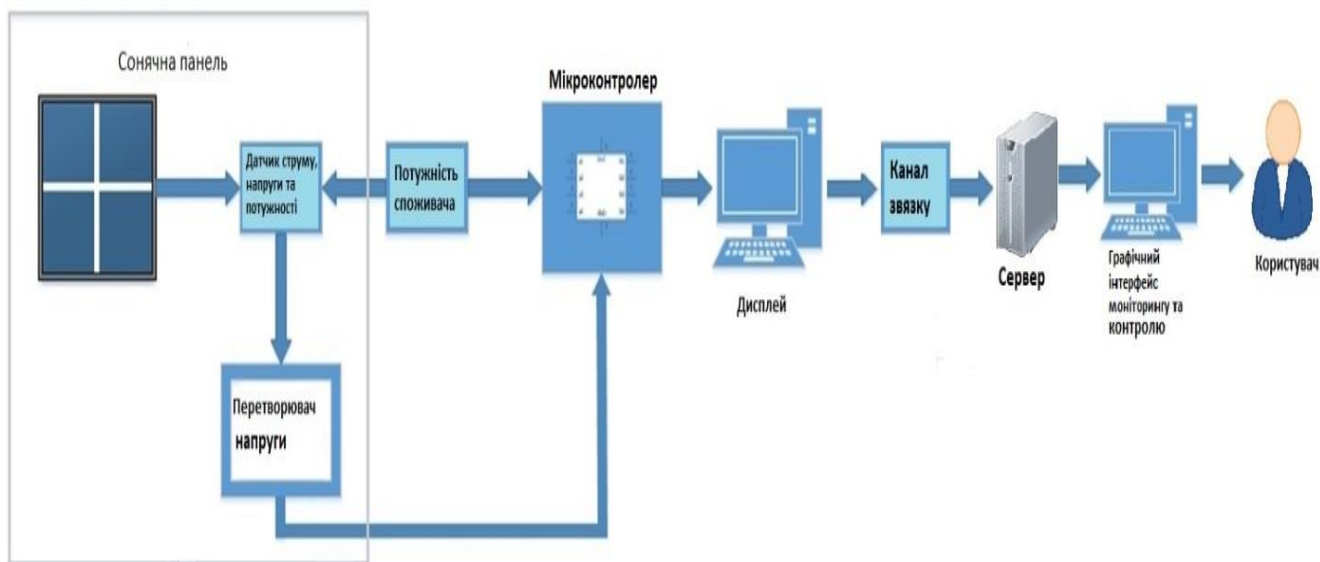


Рисунок. 1.2 – Загальна структура схема системи моніторингу сонячних панелей у реальному масштабі часу

Збір даних виконується контролером, який використовується для збору даних з різних датчиків перед відправкою їх на центральний комп'ютер. Дані датчика складаються з аналогових сигналів, які контролер потім перетворює в цифрові дані для зберігання, аналізу та презентації.

Існує велика кількість баз даних, доступних для використання на смартфоні на основі Android: SQLite, Sybase SQL Anywhere, OracleDBLite, IBMDB2 Everywhere. Існує три типи серверів, які працюють на смартфонах на базі ОС Android.

Щоб запуститись з функцією сервера, пристрій на базі ОС Android зобов'язаний мати протоколи обміну, які забезпечують обмін інформації. Кожен протокол складається з правил підключення, які комп'ютерами або програмами, щоб підключитися до сервера. Існують такі сервери: веб-сервер, файловий-сервер та медіа-сервер [8-10].

Датчики напруги та струму між модулем сонячної панелі та контролером заряду вимірюють потужність, вироблену сонячною панеллю. Датчики напруги та струму між контролером заряду (функція перезарядки) та акумулятором вимірюють потужність накопичення

Датчик струму між акумулятором та контролером заряду (функція зарядки) у поєднанні з датчиком напруги між акумулятором та контролером заряду (функція зарядки) вимірюватиме потужність, що подається акумулятором [10].

Датчики напруги та струму між контролером заряду (функція навантаження) та інвертором потужності вимірюють потужність, що генерується акумулятором, за допомогою інвертора потужності. Зібрані аналогові дані будуть оброблені та оцифровані контролером IOIO OTG. Цифрові дані будуть передані на смартфон (Android), де вони будуть зберігатися в базі даних SQLite. Смартфон (Android) також буде виконувати функції сервера, а збережені дані будуть доступні через Інтернет.

1.3 Математична модель фотоелектричного перетворювача

Будь яка сонячна панель складається із сукупності послідовно та паралельно з'єднаних фотоелектричних перетворювачів. Кожний фотоелектричний перетворювач – це напівпровідниковий електричний пристрій, який перетворює сонячну енергію в електричну енергію.

Еквівалентну схему заміщення фотоелектричного перетворювача можна зобразити у вигляді джерела фото струму, яке з'єднане із напівпровідниковим діодом паралельно, а також послідовно з'єднаним опором R_s та паралельно з'єднаним опором R_{sh} . Еквівалентна схема заміщення фотоелектричного перетворювача зображена на рисунку 1.3.

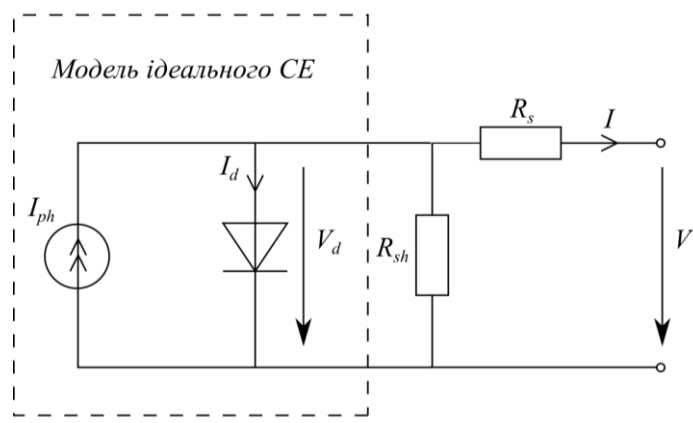


Рисунок 1.3 – Еквівалентна схема заміщення фотоелектричного перетворювача

Джерело фото струму створює на виході фотоелектричного перетворювача струм s та нпругу V . Залежність між струмом I та нпругою V описується рівнянням (1.1).

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

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

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

A – коефіцієнт, який називається діодним коефіцієнтом ідеальності;

I_s – визначає струм насичення, або зворотній струм;

T – температура фотоелектричного перетворювача.

Розрахунок графіків залежності струму, який протікає через фотоелектричний перетворювач, а також напруги на виході фотоелектричного перетворювача, зображено на рисунку 1.4.

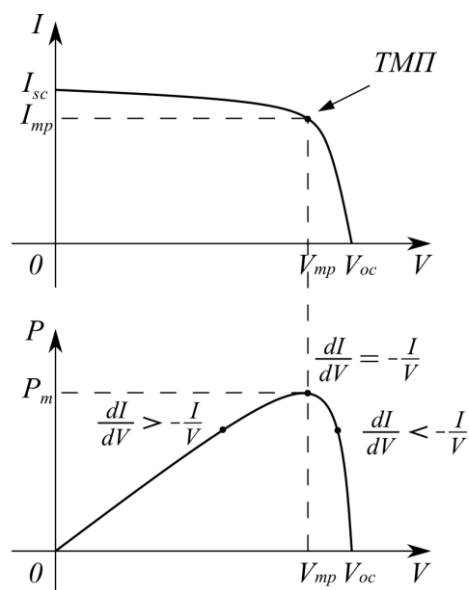


Рисунок 1.4 – Залежності струму фотоелектричного перетворювача та потужності фотоелектричного перетворювача від напруги на його виході

Аналізуючи графіки залежності струму фотоелектричного перетворювача та потужності фотоелектричного перетворювача від напруги на його виході, які зображені на рисунку 1.4, можна зробити висновок, що існує точка максимальної потужності фотоелектричного перетворювача ТМП. У цій точці похідна струму по напрузі дорівнює відношенню $-I/V$, причому до ТМП похідна струму по напрузі більша за $-I/V$, а після ТМП похідна струму по напрузі менша за $-I/V$.

На еквівалентній схемі заміщення фотоелектричного перетворювача, яка зображена на рисунку 1.3, показано діод, а також струм, який проходить через нього I_d та напругу на діоді V_d . Вираз (1.2) описує залежність струму, який проходить через діод I_d від напруги на діоді V_d .

$$I_d = I_s \left[\exp\left(\frac{V_d}{mV_T}\right) - 1 \right] \quad (1.2)$$

Аналізуючи вираз (1.2) можна зробити висновок, що струм, який протікає через діод залежить від діодного коефіцієнта ідеальності m . Нпругу на діоді можна описати за допомогою виразу (1.3).

$$V_d = V + IR_s. \quad (1.3)$$

Також до складу виразу струм, який проходить через діод I_d (1.2) входить величина теплового потенціалу V_T , який визначається виразом (1.4).

$$V_T = \frac{N_s k T}{q}, \quad (1.4)$$

де N_s – величина послідовно з'єднаних фотоелектричних перетворювачів у складі сонячної панелі;

T – визначає температура p - n -переходу;

k – визначає постійну Больцмана;

q – дорінює модулю заряду електрона.

Враховуючи вирази (1.2), (1.3) та (1.4) можна записати вираз струму, який проходить через сонячну панель, що складається із послідовно з'єднаних фотоелектричних перетворювачів.

$$I = I_{ph} - I_s \left[\exp\left(\frac{V + IR_s}{mV_T}\right) - 1 \right] - \frac{V + IR_s}{R_{sh}}. \quad (1.5)$$

Математична модель залежності струму фотоелектричного перетворювача від напруги на його виході містить невідомі параметри: I_{ph} , I_s , m , R_s та R_{sh} . Усі ці параметри визначити одразу досить складно, тому в інженерних розрахунках на першому етапі роблять припущення, що $R_s = 0$ та $R_{sh} = \infty$. Цим припущенням відповідає спрощена модель фотоелектричного перетворювача, яка описується виразом (1.6).

$$I = I_{ph} - I_s \left[\exp\left(\frac{V}{mV_T}\right) - 1 \right]. \quad (1.6)$$

До складу виразу (1.6) входить параметр m , який для полікристалічного кремнію $m = 1,3$. Інші невідомі параметри: I_{ph} , I_s , R_s та R_{sh} визначаються в режимі короткого замикання, холостого ходу та у режимі, що відповідає точці максимальної потужності (ТМП).

Виробники сонячних панелей визначають для своїх виробів значення струму короткого замикання I_{sc0} , напруги холостого ходу V_{oc0} , а також струму та напруги в точці максимальної потужності P_{mp0} . Виробники сонячних панелей визначають ці параметри при температурі $T = 25^\circ\text{C}$, та інтенсивності сонячного випромінювання $G = 1 \text{ кВт/м}^2$, що відповідають тестовим умовам.

В режимі короткого замикання напруга на виході сонячної панелі дорівнює 0 В, а струм короткого замикання I_{sc0} вказується виробником у технічних параметрах сонячної панелі. Підставивши у вираз (1.6) $V=0$ В та $I = I_{sc0}$ можна стверджувати, що фотострум приблизно дорівнює струму короткого замикання при тестових умовах.

$$I_{ph0} \approx I_{sc0}. \quad (1.7)$$

Для підвищення точності моделювання припустимо, що:

$$I_{ph0} = \alpha I_{sc0}, \quad (1.8)$$

де α – деякий коефіцієнт пропорційності.

Для промислових сонячних панелей значення фотоструму I_{ph} залежить від температури фотоелектричного перетворювача. Важливою також є інтенсивність сонячного випромінювання G . Звідси випливає, що для промислових сонячних панелей вираз фотоструму I_{ph} визначається рівнянням (1.9).

$$I_{ph} = \frac{G}{G_o} [1 - K_I (T - T_o)] I_{ph0}, \quad (1.9)$$

де $G_o = 1$ кВт/м² – інтенсивність сонячного випромінювання при стандартних тестових умовах;

$T_o = 25^\circ\text{C}$ – температура СЕ при стандартних тестових умовах;

K_I – температурний коефіцієнт короткого замикання, 1/К.

В режимі холостого ходу струм сонячної панелі I дорівнює 0 А, а напруга холостого ходу V_{oc0} сонячної панелі вказується виробниками для стандартних тестових умов. Підставивши ці значення у вираз (1.6) та враховуючи вираз (1.9) можна записати вираз для визначення струму насичення діода при тестових умовах.

$$I_{s0} = \frac{I_{sc0}}{\exp\left(\frac{V_{oc0}}{mV_{T0}}\right) - 1} \quad (1.10)$$

де V_{oc0} – напруга холостого ходу сонячної панелі при тестових умовах;
 V_{T0} – тепловий потенціал при $T = T_0$.

Струм насичення діода сонячної панелі I_s залежить від температури. Ця залежність визначається температурними коефіцієнтами короткого замикання та холостого ходу. Залежність струм насичення діода сонячної панелі I_s залежить від температури описується виразом (1.11).

$$I_s = \frac{I_{sc0}(1 + K_I \Delta T)}{\exp\left(\frac{V_{oc0}(1 + K_V \Delta T)}{mV_T}\right) - 1}, \quad (1.11)$$

де $\Delta T = T - T_0$;

K_V – температурний коефіцієнт холостого ходу.

Послідовний опір R_s та паралельний опір R_{sh} можна визначити в точці максимальної потужності сонячної панелі. Виробники сонячних панелей вказують значення струму $I = I_{mp}$, напруги $V = V_{mp}$ та потужності $P = P_{mp}$ в точці максимальної потужності сонячної панелі. Підставимо ці значення у вираз потужності сонячної панелі (1.12).

$$P = V \cdot I. \quad (1.12)$$

Враховуючи вираз струму насичення діода при тестових умовах (1.10) можна записати рівняння (1.13), до складу якого входять паралельний опір R_{sh} та послідовний опір R_s .

$$R_{sh} = \frac{V_{mp} + I_{mp} R_s}{I_{ph} - I_s \left[\exp\left(\frac{V_{mp} + I_{mp} R_s}{mV_T}\right) - 1 \right] - I_{mp}}. \quad (1.13)$$

Базуючись на рівнянні (1.13), якщо задати значення R_s , то можна визначити величину R_{sh} . Ці два значення відповідають теоретичній вольт-амперній характеристиці, яка у цьому випадку буде проходити через експериментальну точку максимальної потужності.

Змінюючи величину R_s від $R_s = 0$, визначаємо пари значень R_s та R_{sh} , для яких теоретична точка максимальної потужності відповідатиме експериментальній точці максимальної потужності з певною похибкою апроксимації.

Для величин R_s та R_{sh} необхідно визначити максимальне значення потужності P , яке описує теоретичну вольт-амперну характеристику. Це означає, що існують значення R_s та R_{sh} , які наближаються до оптимальних, а математична модель фотоелектричного перетворювача буде відповідати експериментальним параметрам і характеристика реальної сонячної панелі.

Для визначення нульового значення R_{sh} використаємо вираз (1.14).

$$R_{sh0} = \frac{V_{mp}}{I_{sc0} - I_{mp}} - \frac{V_{oc0} - V_{mp}}{I_{mp}}, \quad (1.14)$$

де I_{mp} та V_{mp} – значення, які лежать у точці максимальної потужності сонячної панелі.

Для реальних сонячних панелей $I_{ph0} \neq I_{sc0}$. Вираз фотоструму I_{ph0} записати, зробивши заміну у виразі (1.8) $\alpha = (1 + R_s/R_{sh})$. Тоді отримаємо рівняння фотоструму I_{ph0} у вигляді (1.15).

$$I_{ph0} = \left(1 + \frac{R_s}{R_{sh}}\right) I_{sc0} \quad (1.15)$$

Рівняння (1.15) не можна розв'язати відносно струму чи напруги, отримавши розв'язок у вигляді елементарних функцій. Розв'язання рівняння (1.15) можливе лише, якщо виразити струм, як $I = I(V)$ (або напругу $V = V(I)$), використовуючи функцію Ламберта (W-функцію).

Функція Ламберта (W-функція) визначається через обернену функцію до функції $f(w) = we^w$. У цьому випадку використовують комплексні значення для змінної w . Функція Ламберта (W-функція) для комплексної змінної z визначається із виразу (1.16).

$$z = W(z)e^{W(z)}. \quad (1.16)$$

Функція Ламберта (W-функція) для комплексної змінної z має багато різних значень на проміжку $[-1/e, 0]$. На рисунку 1.5 показано графік двох дійсних гілок функції Ламберта (W-функції).

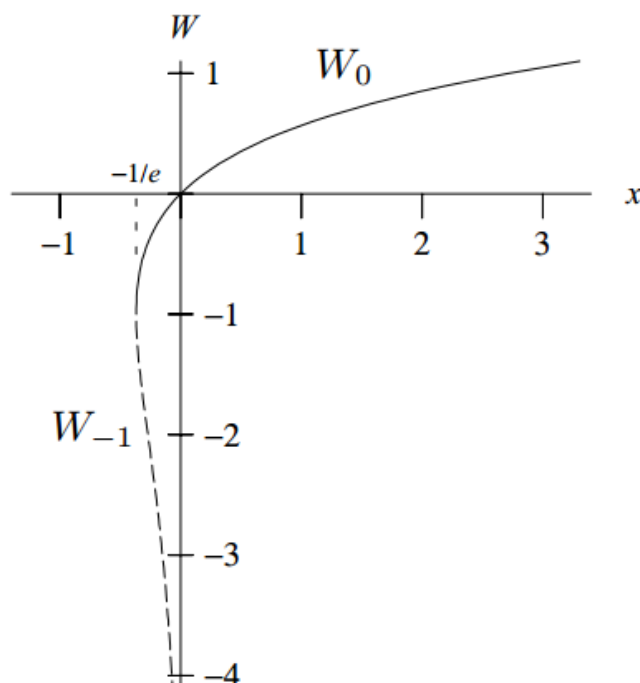


Рисунок 1.5 – Функція Ламберта (W-функція):

W_0 - для додатніх значень;

W_{-1} - для від'ємних значень

Якщо $z = x \geq -1/e$, а також $w \geq -1$, тоді функція Ламберта (W-функція) є однозначно визначеною.

Якщо прийняти, що $z \neq -1/e$, тоді функція Ламберта (W-функція) може бути визначена із диференційного рівняння (1.17).

$$\frac{dW(z)}{dz} = \frac{1}{z} \cdot \frac{W(z)}{W(z)+1}. \quad (1.17)$$

У випадку фотоелектричного перетворювача його напруга та струм є додатніми величинами, тому в процесі математичного моделювання вони можуть описуватися функцією Ламберта (W-функцію) в інтервалі величин, при яких працює сонячна панель.

Тоді рівняння (1.17) буде мати вигляд (1.18).

$$\exp\left(\frac{R_s}{mV_T}I + \frac{V}{mV}\right) = -\frac{R_{sh} + R_s}{I_0R_{sh}}I + \frac{(I_{ph} + I_0)R_{sh} - V}{I_0R_{sh}}. \quad (1.18)$$

Для спрощення виразу (1.18), позначимо частину операцій буквами A , B , C та D , у відповідності до виразів (1.19), (1.20), (1.21) та (1.22) відповідно.

$$A = \frac{R_s}{mV_T}; \quad (1.19)$$

$$B = \frac{V}{mT_T}; \quad (1.20)$$

$$C = -\frac{R_{sh} + R_s}{I_0R_{sh}}; \quad (1.21)$$

$$D = \frac{(I_{ph} + I_0)R_{sh} - V}{I_0 R_{sh}}. \quad (1.22)$$

З урахування позначень у виразах (1.19), (1.20), (1.21) та (1.22) вираз (1.18) можна записати у спрощеному вигляді (1.23).

$$e^{AI+B} = CI + D \quad (1.23)$$

У виразі (1.23) позначимо $AI + AD/C = -t$ і запишемо його у вигляді (1.24).

$$te^t = -\frac{A}{C} e^{B - \frac{AD}{C}} \quad (1.24)$$

Використавши W-функцію Ламберта, отримаємо:

$$t = W\left(-\frac{A}{C} e^{B - \frac{AD}{C}}\right) \quad (1.25)$$

Далі зробимо зворотню заміну у виразі (1.25) у відповідності до виразів (1.19), (1.20), (1.21) та (1.22).

$$I(V) = \frac{R_{sh}(I_{ph} + I_0) - V}{R_{sh} + R_s} - \frac{mV_T}{R_s} W\left(\frac{R_s R_{sh} I_0}{mV_T (R_{sh} + R_s)} \exp\left(\frac{R_{sh} R_s (I_{ph} + I_0) + R_{sh} V}{(R_{sh} + R_s) mV_T}\right)\right). \quad (1.26)$$

По аналогії із виразом для струму (1.26), можна записати вираз для напруги (1.27).

$$V(I) = (I_{ph} + I_0 - I)R_{sh} - IR_s - mV_T W \left(\frac{I_0 R_{sh}}{mV_T} \exp \left(\frac{(I_{ph} + I_0 - I)R_{sh}}{mV_T} \right) \right). \quad (1.27)$$

Для визначення виразу потужності сонячної панелі $P = P(V)$ скористаємося виразом (1.27), зробивши заміни у відповідності до виразів (1.28), (1.29) та (1.30).

$$\frac{R_{sh}(I_{ph} + I_0)}{R_{sh} + R_s} = \Psi; \quad (1.28)$$

$$\frac{R_s R_{sh} I_0}{mV_T (R_{sh} + R_s)} \exp \left(\frac{R_{sh} R_s (I_{ph} + I_0)}{(R_{sh} + R_s) mV_T} \right) = \Theta; \quad (1.29)$$

$$\frac{R_{sh}}{(R_{sh} + R_s) mV_T} = \Phi. \quad (1.30)$$

Тоді вираз для потужності сонячної панелі $P(V)$ запишемо у вигляді (1.31).

$$P(V) = \Psi V - \frac{V^2}{R_{sh} + R_s} - \frac{mV_T}{R_s} V \cdot W(\Theta e^{\Phi V}). \quad (1.31)$$

Запишемо диференціал для лівої та правої частини виразу (1.31), тоді отримаємо вираз (1.32).

$$\frac{dP}{dV} = \Psi - \frac{2V}{R_{sh} + R_s} - \frac{mV_T}{R_s} \left[W(\Theta e^{\Phi V}) + \frac{\Phi V \cdot W(\Theta e^{\Phi V})}{W(\Theta e^{\Phi V}) + 1} \right] \quad (1.32)$$

У точці максимальної потужності сонячної батареї похідна dP/dV дорівнює нулю, тому необхідно в процесі моделювання сонячної панелі

прирівняти ліву частину рівняння (1.32) до нуля, а далі розв'язати отримане однорідне рівняння.

Висновки до першого розділу

1. Базова структура сонячної електростанції включає в себе чотири основні компоненти: сонячні панелі; контролер заряду; інвертор; акумуляторний блок. Дані компоненти необхідні для безперебійного функціонування сонячної електростанції.

2. Безвідмовна робота сонячних панелей і всіх елементів сонячної електростанції є необхідною умовою для ефективного виробництва електроенергії і прибутковості інвестицій у сонячну електростанцію. Щоб гарантувати тривалу безаварійну роботу, потрібен періодичний аудит (діагностика, рекомендації щодо усунення недоліків) усіх елементів сонячної електростанції.

3. Еквівалентну схему заміщення фотоелектричного перетворювача можна зобразити у вигляді джерела фото струму, яке з'єднане із напівпровідниковим діодом паралельно, а також послідовно з'єднаним опором R_s та паралельно з'єднаним опором R_{sh} .

2. Удосконалений метод моніторингу сонячних панелей

2.1 Достовірність моніторингу сонячних панелей

В процесі експлуатації сонячних панелей використовується вимірвальний моніторинг їх параметрів, який встановлює факт перебування значень параметрів сонячних панелей відносно їх гранично допустимих значень шляхом проведення процедури вимірювання.

Достовірність моніторингу сонячних панелей – це ступінь об'єктивної відповідності результату моніторингу сонячних панелей дійсному технічному стану сонячних панелей, яка оцінюється імовірністю прийняття правильного рішення про стан сонячних панелей. Складовими загальної достовірності моніторингу сонячних панелей є методична достовірності моніторингу сонячних панелей та інструментальна достовірності моніторингу сонячних панелей, які входять до складу виразу (2.1).

$$D_z = D_M(N_1, S_1) \cdot D_I(\alpha, \beta), \quad (2.1)$$

де $D_M(N_1, S_1)$ – методична достовірність моніторингу сонячних панелей;

$D_I(\alpha, \beta)$ – інструментальна достовірність моніторингу сонячних панелей;

N_1 – кількість показників стану сонячних панелей, які визначаються в процесі моніторингу сонячних панелей;

S_1 – загальна кількість технічних станів сонячних панелей;

α – імовірність помилок першого роду в процесі моніторингу сонячних панелей;

β – імовірність помилок другого роду в процесі моніторингу сонячних панелей.

Методична достовірність моніторингу сонячних панелей визначається двома складовими: показником відповідності моделі сонячних панелей C_B .

$$D_M(N_1, S_1) = C_B \cdot C_{ПК}, \quad (2.2)$$

$$C_B = \frac{N_1}{N}, \quad (2.3)$$

де N_1 – кількість показників, які характеризують технічний стан сонячних панелей, що входять до складу математичної моделі сонячних панелей;

N – загальна кількість показників, що характеризують технічний стан моніторингу сонячних панелей.

Іструментальна достовірність моніторингу сонячних панелей визначається імовірностями помилок моніторингу сонячних панелей першого та другого роду відповідно α і β та описується виразом (2.4).

$$D_I(\alpha, \beta) = 1 - \alpha - \beta. \quad (2.4)$$

2.2 Загальна структурна схема системи моніторингу сонячних панелей

В процесі вдосконалення методу моніторингу сонячних панелей необхідно враховувати властивості сонячних панелей, які відображують їх технічний стан. Крім номінальних показників технічного стану сонячних панелей, а саме вихідного струму сонячної панелі I , вихідної напруги сонячної панелі U та вихідної потужності сонячної панелі P , на якість сонячної панелі впливає зміна цих параметрів сонячної панелі внаслідок зміни освітленості та температури сонячної панелі $I(G, T)$, $U(G, T)$ та $P(G, T)$. Загальна структурна схема системи моніторингу сонячних панелей зображена на рисунку 2.1.

В процесі моніторингу сонячних панелей на них діють зовнішні впливні фактори: рівень освітленості та температура $\{G(t), T(t)\}$. Блок вимірювання контрольованих параметрів вимірює параметри сонячних панелей $I(G,T)$, $U(G,T)$ та $P(G,T)$, а блок перетворення впливних факторів перетворює їх у сигнали впливних факторів.

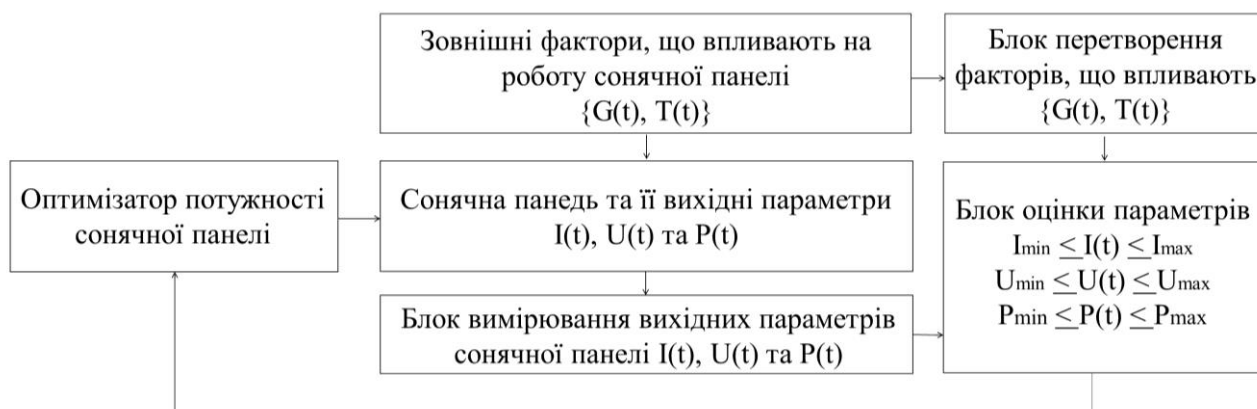


Рисунок 2.1 – Загальна структурна схема системи моніторингу сонячних панелей

Виміряні параметри сонячних панелей та перетворена множина впливних факторів поступають на блок оцінки параметрів сонячних панелей, який визначає оцінку Q (справна або несправна сонячна панель). Процес моніторингу сонячних панелей може здійснюватись у стаціонарному або нестаціонарному режимах, які визначаються режимом вимірювання параметрів сонячних панелей.

Розглянемо модель моніторингу сонячних панелей у стаціонарному режимі, яка базується на вимірюванні вихідного струму сонячної панелі I , вихідної напруги сонячної панелі U та вихідної потужності сонячної панелі P . В результаті таких вимірювань отримуємо три вимірних значення: I , U та P .

Далі висуваються дві гіпотези.

1. Основна гіпотеза H_0 (сонячна панель придатна)

$$H_0: I \in [I_H, I_B] \cap U \in [U_H, U_B] \cap P \in [P_H, P_B], \quad (2.5)$$

де $I_H, I_B; U_H, U_B$ та P_H, P_B – межі допускового інтервалу відповідно для I, U та P .

2. Альтернативна гіпотеза H_1 (сонячна панель непридатна)

$$H_1: I \notin [I_H, I_B] \cap U \notin [U_H, U_B] \cap P \notin [P_H, P_B]. \quad (2.6)$$

Достовірність моніторингу сонячних панелей визначається добутком методичної достовірності моніторингу сонячних панелей на інструментальну достовірність моніторингу сонячних панелей. В свою чергу методична достовірність моніторингу сонячних панелей визначається відношенням кількості показників, які характеризують технічний стан сонячних панелей, що входять до складу математичної сонячних панелей, до загальної кількості показників, що характеризують технічний стан сонячних панелей.

Звідси можна зробити висновок, що найпростіша модель моніторингу сонячних панелей у стаціонарному режимі, яка базується на одноразовому вимірюванні вихідного струму сонячної панелі I , вихідної напруги сонячної панелі U та вихідної потужності сонячної панелі P , характеризується низькою методичною достовірністю моніторингу сонячних панелей. Це пояснюється тим, що для сонячних панелей вихідний струм $I \neq \text{const}$, вихідна напруга $U \neq \text{const}$ та вихідна потужність сонячної панелі $P \neq \text{const}$.

У випадку найпростішої моделі моніторингу сонячних панелей у стаціонарному режимі кількість показників, які характеризують технічний стан сонячної панелі $N_1=3$ (вихідний струм сонячної панелі I , вихідна напруга сонячної панелі U та вихідна потужність сонячної панелі P).

Що стосується загальної кількості показників, які характеризують технічний стан сонячної панелі, то залежність параметрів сонячної панелі, а саме струму, напруги та потужності, при зміні освітленості та температури сонячної

панелі $I(G,T)$, $U(G,T)$ і $P(G,T)$ є еквівалентним збільшенню загальної кількості показників, які характеризують технічний стан сонячної панелі.

Звідси можна зробити висновок, що $N \neq N_1$ і $N \gg N_1$, а методична достовірність моніторингу сонячних панелей для найпростішої моделі моніторингу сонячних панелей у стаціонарному режимі значно менша одиниці.

$$D_m = \frac{3}{N} \ll 1. \quad (2.7)$$

Інструментальна достовірність моніторингу сонячних панелей визначається виразом (2.4) до складу якого входять ймовірності помилок першого та другого роду відповідно α і β відповідно вирази (2.6) та (2.7). Ймовірності помилок першого та другого роду визначаються окремо для вихідного струму сонячної панелі I , вихідної напруги сонячної панелі U та вихідної потужності сонячної панелі P у відповідності з виразами (2.9), (2.9), (2.10), (2.11), (2.12) і (2.13).

$$\alpha_I = \int_{I_H}^{I_B} f(I) \left(\int_{-\infty}^{I_H-I} f(\delta_I) d\delta_I \right) dI + \int_{I_H}^{I_B} f(I) \left(\int_{I_B-I}^{\infty} f(\delta_I) d\delta_I \right) dI; \quad (2.8)$$

$$\beta_I = \int_{-\infty}^{I_H} f(I) \left(\int_{I_H-I}^{I_B-I} f(\delta_I) d\delta_I \right) dI + \int_{I_B}^{\infty} f(I) \left(\int_{I_H-I}^{I_B-I} f(\delta_I) d\delta_I \right) dI, \quad (2.9)$$

де I_B , I_H – допускові верхнє та нижнє значення вихідного струму сонячної панелі I ; $f(I)$ – щільність ймовірності вихідного струму сонячної панелі I ; $f(\delta_I)$ – щільність ймовірності похибки вимірювання вихідного струму сонячної панелі I .

$$\alpha_U = \int_{U_H}^{U_B} f(U) \left(\int_{-\infty}^{U_H-U} f(\delta_U) d\delta_U \right) dU + \int_{U_H}^{U_B} f(U) \left(\int_{U_B-U}^{\infty} f(\delta_U) d\delta_U \right) dU; \quad (2.10)$$

$$\beta_U = \int_{-\infty}^{U_H} f(U) \left(\int_{U_H-U}^{U_B-U} f(\delta_U) d\delta_U \right) dU + \int_{U_B}^{\infty} f(U) \left(\int_{U_H-U}^{U_B-U} f(\delta_U) d\delta_U \right) dU, \quad (2.11)$$

де U_B, U_H – допускові верхнє та нижнє значення вихідної напруги сонячної панелі U ; $f(U)$ – щільність ймовірності вихідної напруги сонячної панелі U ; $f(\delta_U)$ – щільність ймовірності похибки вимірювання вихідної напруги сонячної панелі U .

$$\alpha_P = \int_{P_H}^{P_B} f(P) \left(\int_{-\infty}^{P_H-P} f(\delta_P) d\delta_P \right) dP + \int_{P_H}^{P_B} f(P) \left(\int_{P_B-P}^{\infty} f(\delta_P) d\delta_P \right) dP; \quad (2.12)$$

$$\beta_P = \int_{-\infty}^{P_H} f(P) \left(\int_{P_H-P}^{P_B-P} f(\delta_P) d\delta_P \right) dP + \int_{P_B}^{\infty} f(P) \left(\int_{P_H-P}^{P_B-P} f(\delta_P) d\delta_P \right) dP, \quad (2.13)$$

де P_B, P_H – допускові верхнє та нижнє значення вихідної потужності сонячної панелі P ; $f(P)$ – щільність ймовірності вихідної потужності сонячної панелі P ; $f(\delta_P)$ – щільність ймовірності похибки вимірювання вихідної потужності сонячної панелі P .

Загальні ймовірності помилок першого та другого роду в процесі моніторингу сонячних панелей визначаються виразами (2.14) і (2.15).

$$\alpha = 1 - (1 - \alpha_I)(1 - \alpha_U)(1 - \alpha_P); \quad (2.14)$$

$$\beta = 1 - (1 - \beta_I)(1 - \beta_U)(1 - \beta_P). \quad (2.15)$$

Тоді загальна достовірність моніторингу сонячних панелей для найпростішої моделі моніторингу сонячних панелей у стаціонарному режимі визначається виразом (2.16)

$$D_3 = D_M \cdot D_I = \frac{3}{N} \cdot (1 - \alpha - \beta) \ll 1. \quad (2.16)$$

Оцінку якості моніторингу сонячних панелей у стаціонарному режимі для спрощеної моделі можна розрахувати також за формулою середнього ризику моніторингу сонячних панелей, яка описується виразом (2.17).

$$\Psi \approx W_{1I} \alpha_I + W_{2I} \beta_I + W_{1U} \alpha_U + W_{2U} \beta_U + W_{1P} \alpha_P + W_{2P} \beta_P, \quad (2.17)$$

де W_{1I} , W_{1U} та W_{1P} – втрати, які обумовлені помилками 1-го роду для кожного параметра відповідно I , U та P ;

W_{2I} , W_{2U} та W_{2P} – втрати, які обумовлені помилками 2-го роду для кожного параметра відповідно I , U та P ;

α_I , α_U та α_P – імовірності помилок 1-го роду для кожного параметра відповідно I , U та P ;

β_I , β_U та β_P – імовірності помилок 2-го роду для кожного параметра відповідно I , U та P .

2.3 Підвищення достовірності удосконаленого методу моніторингу сонячних панелей

Підвищення достовірності моніторингу сонячних панелей, а отже і їх якості роботи, можливе за рахунок використання характеристик сонячних панелей, які містять інформацію про номінальні показники ТС сонячних панелей

в діапазоні зміни величини освітленості сонячних панелей в робочому діапазоні зміни температури. Такими характеристиками є залежність параметрів сонячної панелі, а саме струму, напруги та потужності від освітленості та температури сонячної панелі $I(G,T)$, $U(G,T)$ і $P(G,T)$.

Відповідно до загальної структури схеми системи моніторингу сонячних панелей (рисунок 2.1), на вході сонячної панелі діють зовнішні впливні фактори: рівень освітленості $G(t)$ та температура $T(t)$, а вимірюється струм сонячної панелі $i_g(t)$, напруга сонячної панелі $u_g(t)$ та потужність сонячної панелі $p_g(t)$ відповідно.

Оператори I , U та P визначають сукупність математичних дій над рівнем освітленості $G(t)$ та температурою $T(t)$, які дозволяють отримати значення $i_g(t)$, $u_g(t)$ та $p_g(t)$ відповідно вирази (2.18), (2.19) та (2.20).

$$i_g(t) = I[G(t), T(t)]; \quad (2.18)$$

$$u_g(t) = U[G(t), T(t)]; \quad (2.19)$$

$$p_g(t) = P[G(t), T(t)]. \quad (2.20)$$

Будемо вважати, зовнішні впливні фактори: рівень освітленості та температура $\{G(t), T(t)\}$ спостерігаються без похибки, а вимірюваний струм $i_g(t)$, вимірювана напруга $u_g(t)$ та вимірювана потужність $p_g(t)$ спостерігаються із похибками у відповідності до виразів (2.21), (2.22) та (2.23).

$$i_g^*(t) = i_g(t) + \Delta i_g(t); \quad (2.21)$$

$$u_g^*(t) = u_g(t) + \Delta u_g(t); \quad (2.22)$$

$$p_g^*(t) = p_g(t) + \Delta p_g(t); \quad (2.23)$$

де $\Delta i_g(t)$, $\Delta u_g(t)$ та $\Delta p_g(t)$ стаціонарні випадкові процеси моніторингу сонячних панелей з відомими характеристиками.

Звідси можна зробити висновок, що в процесі моніторингу сонячних панелей необхідно визначити оцінку визначених операторів I_g , U_g та P_g , які наближаються до операторів I , U та Y , що описують характеристики сонячних панелей. Враховуючи, що оператори I , U та Y в більшості випадків є невідомими, для опису сонячних панелей використовують їх математичні моделі, які характеризуються операторами I_m , U_m та P_m .

Критерієм, за яким оцінюється близькість операторів I_g , U_g , P_g , та I_m , U_m , P_m є наближеність вимірюваної напруги $u_g(t)$, вимірюваного струму $i_g(t)$ та вимірюваної потужності $p_g(t)$ до напруги $u_m(t)$, струму $i_m(t)$ та потужності $p_m(t)$ моделі при однакових зовнішніх впливних факторів: рівню освітленості $G(t)$ та температури $T(t)$ відповідно.

Введемо невід'ємні функції втрат $\eta_u[u_g(t), u_m(t)]$, $\eta_i[i_g(t), i_m(t)]$ та $\eta_p[p_g(t), p_m(t)]$, які залежать від вимірюваних напруги, струму та потужності сонячної панелі та її моделі, а також визначають величину втрат в процесі моніторингу сонячних панелей, що пов'язані з різними комбінаціями $u_g(t)$ і $u_m(t)$, $i_g(t)$ і $i_m(t)$, $p_g(t)$ і $p_m(t)$.

Середні втрати моніторингу сонячних панелей або середній ризик моніторингу сонячних панелей визначаються математичними сподіваннями функцій втрат моніторингу сонячних панелей $\eta_u[u_g(t), u_m(t)]$, $\eta_i[i_g(t), i_m(t)]$ та $\eta_p[p_g(t), p_m(t)]$ відповідно вирази (2.24), (2.25) та (2.26) відповідно.

$$\bar{\Psi}_u = M \{ \eta_u [u_g(t), u_m(t)] \}; \quad (2.24)$$

$$\bar{\Psi}_i = M \{ \eta_i [i_g(t), i_m(t)] \}; \quad (2.25)$$

$$\bar{\Psi}_p = M \left\{ \eta_p [p_\varepsilon(t), p_M(t)] \right\}. \quad (2.26)$$

З іншого боку, середні ризики моніторингу сонячних панелей визначаються за допомогою виразів (2.27), (2.28) та (2.29).

$$\bar{\Psi}_u = \iint \eta_u(u_\varepsilon, u_M) f_u(u_\varepsilon, u_M) du_\varepsilon du_M; \quad (2.27)$$

$$\bar{\Psi}_i = \iint \eta_i(i_\varepsilon, i_M) f_i(i_\varepsilon, i_M) di_\varepsilon di_M; \quad (2.28)$$

$$\bar{\Psi}_p = \iint \eta_p(p_\varepsilon, p_M) f_p(p_\varepsilon, p_M) dp_\varepsilon dp_M, \quad (2.29)$$

де $f_u(u_\varepsilon, u_M)$, $f_i(i_\varepsilon, i_M)$ та $f_p(p_\varepsilon, p_M)$ - функціонали густин імовірностей напруги, струму та потужності сонячних панелей.

Вирази (2.27), (2.28) та (2.29) можна спростити, якщо зовнішні впливні фактори: рівень освітленості $G(t)$ та температури $T(t)$ є стаціонарними величинами у відповідності до виразів (2.30), (2.31) та (2.32).

$$\bar{\Psi}_u = \int_{u \in U} \eta_u [u_\varepsilon(G(t), T(t)), u_M(G(t), T(t))] f_u(u) du; \quad (2.30)$$

$$\bar{\Psi}_i = \int_{i \in I} \eta_i [i_\varepsilon(G(t), T(t)), i_M(G(t), T(t))] f_i(i) di; \quad (2.31)$$

$$\bar{\Psi}_p = \int_{p \in P} \eta_p [p_\varepsilon(G(t), T(t)), p_M(G(t), T(t))] f_p(p) dp, \quad (2.31)$$

де U – область визначення u ;

I – область визначення i ;

P – область визначення p .

Відхилення визначеної функції струму $i_\varepsilon(G(t), T(t))$ від функції струму моделі $i_M(G(t), T(t))$, визначеної функції напруги $u_\varepsilon(G(t), T(t))$ від функції напруги моделі $u_M(G(t), T(t))$, а також визначеної функції потужності сонячної

панелі $p_g(G(t), T(t))$ від функції потужності моделі сонячної панелі $p_m(G(t), T(t))$, можна оцінити за критерієм рівномірного наближення (максимального відхилення характеристик сонячної панелі) у відповідності до виразів (2.32), (2.33) та (2.34).

$$m_u = \max_{u \in U} |u_g(G(t), T(t)) - u_m(G(t), T(t))|; \quad (2.32)$$

$$m_i = \max_{i \in I} |i_g(G(t), T(t)) - i_m(G(t), T(t))|; \quad (2.33)$$

$$m_p = \max_{p \in P} |p_g(G(t), T(t)) - p_m(G(t), T(t))|. \quad (2.34)$$

Виберемо математичні моделі сонячної панелі $i_m(G(t), T(t))$, $u_m(G(t), T(t))$ та $p_m(G(t), T(t))$ такими, щоб вони задовольняли критеріям рівномірного наближення в діапазонах зміни зовнішніх впливних факторів: рівня освітленості $G(t)$ та температури $T(t)$ сонячної панелі відповідно. Визначимо середні ризики моніторингу сонячних панелей для наступних функцій втрат, які описуються виразами (2.35), (2.36) та (2.37).

$$\eta_u = |u_g(G(t), T(t)) - u_m(G(t), T(t))|^k; \quad (2.35)$$

$$\eta_i = |i_g(G(t), T(t)) - i_m(G(t), T(t))|^k; \quad (2.36)$$

$$\eta_p = |p_g(G(t), T(t)) - p_m(G(t), T(t))|^k; \quad (2.37)$$

Враховуючи вирази (2.35), (2.36) та (2.37) отримаємо вирази (2.38), (2.39) та (2.40) відповідно.

$$\bar{\Psi}_u = \int_{u \in U} |u_g(G(t), T(t)) - u_m(G(t), T(t))|^k f_u(u) du \leq \int_{u \in U} m_u^k f_u(u) du = m_u^k; \quad (2.38)$$

$$\bar{\Psi}_i = \int_{i \in I} |i_g(G(t), T(t)) - i_m(G(t), T(t))|^k f_i(i) di \leq \int_{i \in I} m_i^k f_i(i) di = m_i^k; \quad (2.39)$$

$$\bar{\Psi}_p = \int_{p \in P} |p_g(G(t), T(t)) - p_m(G(t), T(t))|^k f_p(p) dp \leq \int_{p \in P} m_p^k f_p(p) dp = m_p^k. \quad (2.40)$$

Перевагою отриманих виразів (2.38), (2.39) та (2.40) для середніх ризиків моніторингу сонячних панелей у порівнянні з виразами (2.30), (2.31) та (2.32) є можливість розрахунку верхніх меж середніх ризиків моніторингу сонячних панелей, які не залежать від густин ймовірностей $f_u(u)$, $f_i(i)$ та $f_p(p)$ напруги, струму та потужності сонячної панелі відповідно.

Аналізуючи вирази (2.38), (2.39) та (2.40) для середніх ризиків моніторингу сонячних панелей можна зробити висновок, що розробка математичних моделей сонячних панелей, які найбільш точно описують вихідний струм, напругу та потужність сонячних панелей, є надзвичайно важливим для зменшення середніх ризиків моніторингу сонячних панелей.

Висновки до другого розділу

1. Достовірність моніторингу сонячних панелей – це ступінь об’єктивної відповідності результату моніторингу сонячних панелей дійсному технічному стану сонячних панелей, яка оцінюється імовірністю прийняття правильного рішення про стан сонячних панелей. Складовими загальної достовірності моніторингу сонячних панелей є методична достовірності моніторингу сонячних панелей та інструментальна достовірності моніторингу сонячних панелей.

2. В процесі вдосконалення методу моніторингу сонячних панелей необхідно враховувати властивості сонячних панелей, які відображують їх технічний стан. Крім номінальних показників технічного стану сонячних панелей, а саме вихідного струму сонячної панелі I , вихідної напруги сонячної панелі U та вихідної потужності сонячної панелі P , на якість сонячної панелі

впливає зміна цих параметрів сонячної панелі внаслідок зміни освітленості та температури сонячної панелі $I(G,T)$, $U(G,T)$ та $P(G,T)$.

3. Перевагою виразів для середніх ризиків моніторингу сонячних панелей є можливість розрахунку верхніх меж середніх ризиків моніторингу сонячних панелей, які не залежать від густин ймовірностей $f_u(u)$, $f_i(i)$ та $f_p(p)$ напруги, струму та потужності сонячної панелі відповідно.

4. Розробка математичних моделей сонячних панелей, які найбільш точно описують вихідний струм, напругу та потужність сонячних панелей, є надзвичайно важливим для зменшення середніх ризиків моніторингу сонячних панелей.

3 Імітаційна модель та визначення параметрів сонячної панелі

3.1 Методика визначення параметрів сонячної панелі

Аналіз еквівалентної схеми заміщення сонячної панелі показує, що до її складу входить фотострум I_{ph} , струм насичення I_s , коефіцієнт ідеальності p - n -переходу m послідовний опір R_s та паралельний опір R_{sh} . Для підвищення достовірності моніторингу сонячних панелей необхідно визначити ці параметри для зменшення середніх ризиків моніторингу сонячних панелей.

В процесі моніторингу сонячних панелей будемо використовувати значення струму, напруги та потужності сонячної панелі у трьох точках її вольт-амперної характеристики. Першою точкою для визначення параметрів сонячної панелі є точка на її вольт-амперній характеристиці, яка відповідає режиму короткого замикання сонячної панелі. Виробники сонячних панелей вказують струм короткого замикання I_{sc0} , який визначається у стандартних тестових умовах.

Другою точкою для визначення параметрів сонячної панелі є точка на її вольт-амперній характеристиці, яка відповідає режиму холостого ходу сонячної панелі. Напруга холостого ходу V_{oc0} сонячної панелі також вказується виробниками сонячних панелей і ця напруга також вимірюється у стандартних тестових умовах.

Третьою точкою на вольт-амперній характеристиці сонячної панелі є точка максимальної потужності. Цій точці відповідає струм у точці максимальної потужності I_{mp0} , напруга у точці максимальної потужності V_{mp0} та потужність у точці максимальної потужності P_{mp0} сонячної панелі.

Важливим параметром сонячної панелі є коефіцієнт ідеальності m , значення якого відповідає матеріалу, що використовується при виробництві

сонячних панелей. Виробники сонячних панелей вказують у паспортних даних на сонячну панель її коефіцієнт ідеальності m .

Розрахуємо значення струму насичення I_{s0} діода при тестових умовах, використовуючи вираз (3.1).

$$I_{s0} = \frac{I_{sc0}}{\exp\left(\frac{V_{oc0}}{mV_{T0}}\right) - 1} \quad (3.1)$$

де V_{oc0} – значення напруги холостого ходу у тестових умовах роботи;

V_{T0} – значення теплового потенціалу, що відповідає температурі тестових умов $T = T_0$.

У математичній моделі ідеальної сонячної панелі використовується значення фотоструму I_{ph0} , яке прирівнюємо до значення струму короткого замикання сонячної панелі, згідно виразу (3.2).

$$I_{ph0} \approx I_{sc0}, \quad (3.2)$$

де I_{sc0} – значення струму короткого замикання сонячної панелі у тестових умовах.

Щоб розрахувати значення опорів R_s та R_{sh} , а також уточнити значення фотоструму струму I_{ph} , застосуємо ітеративний алгоритм, який базується на поступовому збільшенні послідовного опору R_s та паралельного опору R_{sh} . Далі будемо порівнювати теоретичне значення розрахованої максимальної потужності сонячної панелі із експериментальним значення максимальної потужності сонячної панелі.

Під час виконання ітераційного циклу значення фотоструму I_{ph} будемо уточнювати, використовуючи вираз (3.3).

$$I_{ph0} = \left(1 + \frac{R_s}{R_{sh}}\right) I_{sc0}. \quad (3.3)$$

Напругу сонячної панелі V , яка відповідає теоретичному значенню максимальної потужності, можна визначити, використовуючи рівняння (3.4). Аналітичний розв'язок рівняння (3.4) є досить складним для розрахунків, тому будемо використовувати чисельний розв'язок цього рівняння, використовуючи програмне забезпечення Maple та команду fsolve.

$$\Psi - \frac{2V}{R_{sh} + R_s} - \frac{mV_T}{R_s} \left[W(\Theta e^{\Phi V}) + \frac{\Phi V \cdot W(\Theta e^{\Phi V})}{W(\Theta e^{\Phi V}) + 1} \right] = 0 \quad (3.4)$$

Послідовність розрахунків у програмному забезпеченні Maple визначає методику визначення параметрів сонячної панелі у відповідності до наступних кроків.

1. Необхідно визначити значення струму насичення I_{s0} діода, використовуючи вираз (3.1).
2. Необхідно задати початкове значення послідовного опору $R_s = 0$.
3. Необхідно розрахувати значення паралельного опору R_{sh} , використовуючи вираз (3.5).

$$R_{sh0} = \frac{V_{mp}}{I_{sc0} - I_{mp}} - \frac{V_{oc0} - V_{mp}}{I_{mp}}, \quad (3.5)$$

де I_{mp} та V_{mp} – значення струму та напруги в точці максимальної потужності сонячної панелі.

4. Необхідно розв'язати рівняння (3.4) відносно V та визначити теоретичне значення максимальної потужності $P_{mp,teor}$.

5. Необхідно визначити модуль різниці $\delta = |P_{max} - P_{mp}|$ для заданих значень послідовного опору R_s та паралельного опору R_{sh} .

6. Необхідно порівняти отримане значення модуля різниці $\delta \leq \varepsilon$, де ε – наперед задана похибка розрахунку. Якщо умова виконується, то ітераційний цикл завершується, а якщо ні, то потрібно збільшити величину послідовного опору сонячної панелі R_s на ΔR , а далі знову розрахувати паралельний опір сонячної панелі R_{sh} , використовуючи вираз (3.6).

$$R_{sh} = \frac{V_{mp} + I_{mp} R_s}{I_{ph} - I_s \left[\exp\left(\frac{V_{mp} + I_{mp} R_s}{mV_T}\right) - 1 \right] - I_{mp}}. \quad (3.6)$$

Графічно послідовність розрахунків у програмному забезпеченні Maple, які визначають методику визначення параметрів сонячної панелі R_s та R_{sh} , показано на рисунку 3.1.

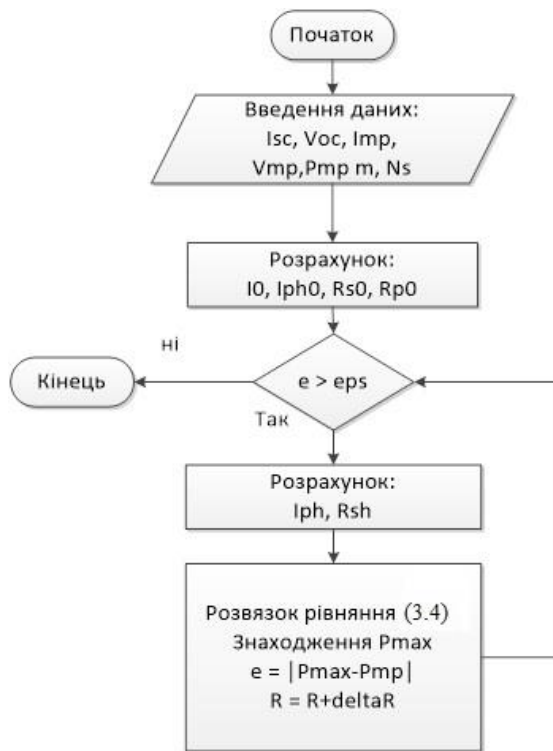


Рисунок 3.1 – Послідовність розрахунків у програмному забезпеченні Maple для визначення значень опорів R_s та R_{sh}

Текст програми у програмному забезпеченні Maple для визначення значень опорів R_s та R_{sh} наведено нижче.

interface(imaginaryunit = j) :

$$I := V \rightarrow \frac{R_{sh} \cdot (I_{ph} + I_0)}{R_{sh} + R_s} - \frac{V}{R_{sh} + R_s} - \frac{m \cdot Vt}{R_s} \cdot \text{LambertW} \left(\frac{R_s \cdot R_{sh} \cdot I_0}{m \cdot Vt \cdot (R_{sh} + R_s)} \right) \cdot \exp \left(\frac{R_{sh} \cdot R_s \cdot (I_{ph} + I_0) + R_{sh} \cdot V}{m \cdot Vt \cdot (R_{sh} + R_s)} \right);$$

$$I := V \rightarrow \frac{R_{sh} (I_{ph} + I_0)}{R_{sh} + R_s} - \frac{V}{R_{sh} + R_s} - \frac{m \cdot Vt \cdot \text{LambertW} \left(\frac{R_s \cdot R_{sh} \cdot I_0 \cdot e^{\frac{R_{sh} \cdot R_s \cdot (I_{ph} + I_0) + R_{sh} \cdot V}{m \cdot Vt \cdot (R_{sh} + R_s)}}}{m \cdot Vt \cdot (R_{sh} + R_s)} \right)}{R_s}$$

$$V := I \rightarrow (I_{ph} + I_0 - I) \cdot R_{sh} - I \cdot R_s - m \cdot Vt \cdot \text{LambertW} \left(\frac{I_0 \cdot R_{sh}}{m \cdot Vt} \right) \cdot \exp \left(\frac{(I_{ph} + I_0 - I) \cdot R_{sh}}{m \cdot Vt} \right);$$

$$V := I \mapsto (I_{ph} + I_0 - I) R_{sh} - I R_s - m V_t \text{LambertW} \left(\frac{(I_{ph} + I_0 - I) R_{sh}}{m V_t} \right) \left(\frac{I_0 R_{sh} e}{m V_t} \right)$$

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

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

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

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

$$I_0 := \frac{I_{sc}}{\exp\left(\frac{V_{oc}}{m \cdot V_t}\right) - 1};$$

$$I_0 := \frac{I_{sc}}{e^{\frac{V_{oc}}{m V_t}} - 1}$$

$$V_t := \frac{N_s \cdot k \cdot T}{q};$$

$$V_t := \frac{N_s k T}{q}$$

$$r_{sh} := r_s \rightarrow \frac{V_{mp} + I_{mp} \cdot r_s}{I_{ph} - I_0 \cdot \left(\exp\left(\frac{V_{mp} + I_{mp} \cdot r_s}{m \cdot V_t}\right) - 1 \right) - I_{mp}};$$

$$r_{sh} := r_s \mapsto \frac{I_{mp} r_s + V_{mp}}{I_{ph} - I_0 \left(e^{\frac{I_{mp} r_s + V_{mp}}{m V_t}} - 1 \right) - I_{mp}}$$

$$R_{s0} := 0.001;$$

$$R_{s0} := 0.001$$

$$R_{sh0} := \frac{V_{mp}}{I_{sc} - I_{mp}} - \frac{V_{oc} - V_{mp}}{I_{mp}};$$

$$R_{sh0} := \frac{V_{mp}}{I_{sc} - I_{mp}} - \frac{V_{oc} - V_{mp}}{I_{mp}}$$

$$I_{sc} := 8.21 :$$

$$V_{oc} := 32.9 :$$

$$I_{mp} := 7.61 :$$

$$V_{mp} := 26.3 :$$

$$N_s := 54 :$$

$$T := 298 :$$

$$q := 1.60217662e-19 :$$

$$k := 1.38064852e-23 :$$

$$m := 1.3 :$$

$$P_{mp} := I_{mp} \cdot V_{mp} :$$

$$err := \text{infinity} : err_prev := \text{infinity} :$$

$$dR := 0.01 : R_s := R_{s0} : R_{sh} := R_{sh0} :$$

$$i := 0 :$$

```

while(err > 0.001) do
Iph := Isc ·  $\left(1 + \frac{R_s}{R_{sh}}\right)$ ;
Rs := Rs0 + i · dR;
i := i + 1;
Rsh := rsh(Rs);
Vm := fsolve(f(v));
Pm := P(Vm);
err_prev := err;
err := abs(Pmp - Pm);
if (err > err_prev) then break end if
end do;

```

Rs; *Rsh*; *Iph*; *err_prev*; *err*; *Pm*; *i*;

0.231
624.0262070
8.214496272
0.0052719
0.0002244
200.1432244

3.2 Імітаційна модель сонячної панелі в середовищі Simulink

В якості середовища імітаційного моделювання сонячної панелі було обрано систему MATLAB/Simulink. У середовищі Simulink імітаційного моделювання було використано імітаційну модель для побудови вольт-амперних та вольт-ватних характеристик сонячної панелі, яка зображена на рисунку 3.2.

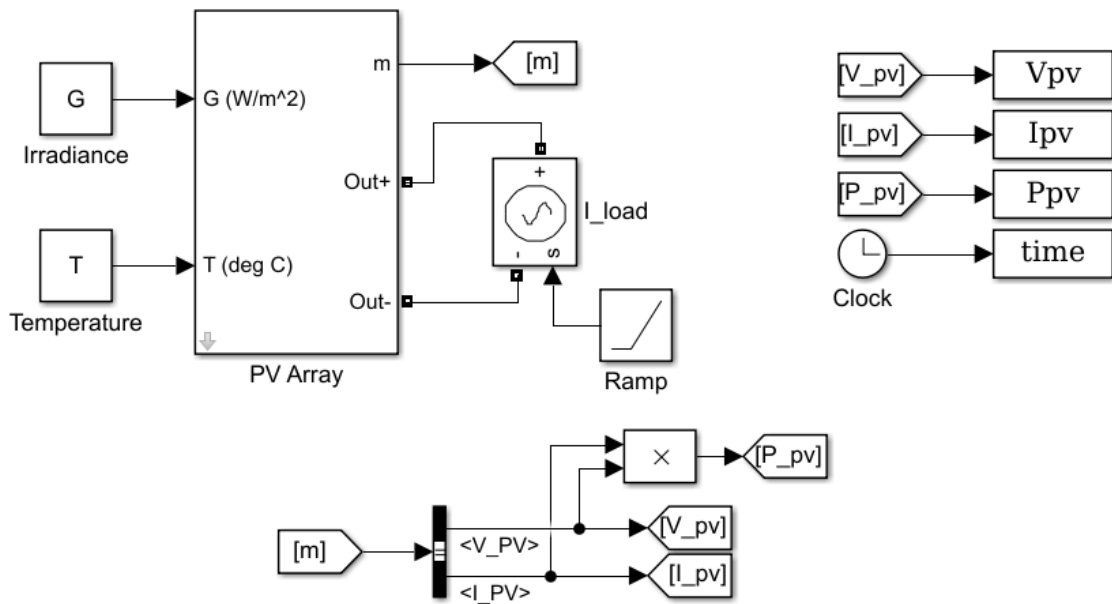


Рисунок 3.2 – Імітаційна модель для побудови вольт-амперних та вольт-ватних характеристик сонячної панелі

Основою імітаційної моделі для побудови вольт-амперних та вольт-ватних характеристик сонячної панелі є підсистеми PV Array. На вхід підсистеми PV Array надходять значення освітленості G і температури T , а з вихода підсистеми PV Array виходять електричні сигнали “Out+” та “Out-”, які повністю узгоджуються із компонентами SimPowerSystems. Також на виході підсистеми PV Array розраховується вихідний вектор вимірюваних величин m .

Для роботи підсистеми PV Array задаються параметри сонячної панелі I_{sc0} , V_{oc0} , K_I , K_V , m , N_s , R_s та R_{sh} , використовуючи маску підсистеми. Для моделювання навантаження сонячної панелі використовується кероване джерело струму, яке моделює лінійне зростання струму навантаження.

Імітаційна модель підсистеми PV Array базується на виразі (3.7).

$$I = I_{ph} - I_s \left[\exp\left(\frac{V + IR_s}{mV_T}\right) - 1 \right] - \frac{V + IR_s}{R_{sh}}. \quad (3.7)$$

На рисунку 3.3 показано особливості внутрішньої структури підсистеми PV Array.

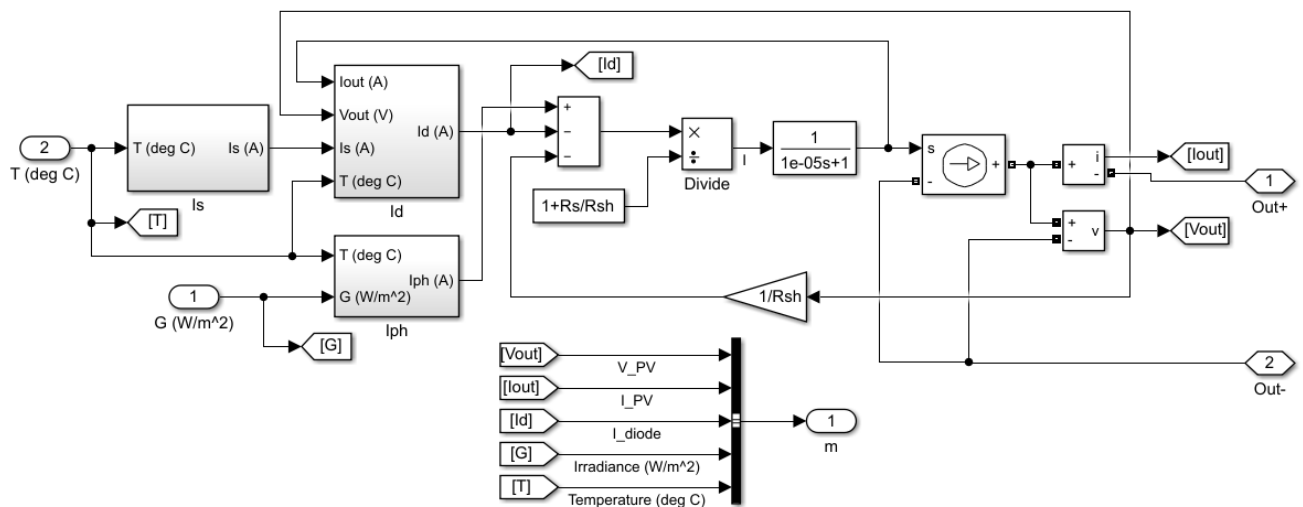


Рисунок 3.3 – Особливості внутрішньої структури підсистеми PV Array

До складу внутрішньої структури підсистеми PV Array входять підсистеми для імітаційного моделювання струмів I_{ph} , I_s , I_d . Кероване джерело струму використовується для імітаційного моделювання вихідних сигналів підсистеми PV Array.

До складу вихідного вектора m входять струм та напруга на виході сонячної панелі, струму діода I_d , а також поточні значень температури сонячної панелі T та рівня інтенсивності сонячного випромінювання G .

Імітаційна модель внутрішньої підсистеми для моделювання фотоструму I_{ph} показана на рисунку 3.4. На вхід внутрішньої підсистеми для моделювання фотоструму I_{ph} надходить температура поверхні сонячної панелі T та рівень інсоляції G .

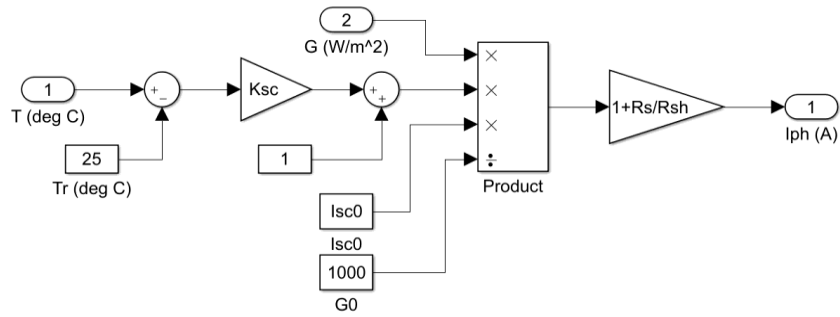


Рисунок 3.4 – Імітаційна модель внутрішньої підсистеми для моделювання фотоструму I_{ph}

Для моделювання струму насичення діода I_s використовується імітаційна модель внутрішньої підсистеми, яка показана на рисунку 3.5,

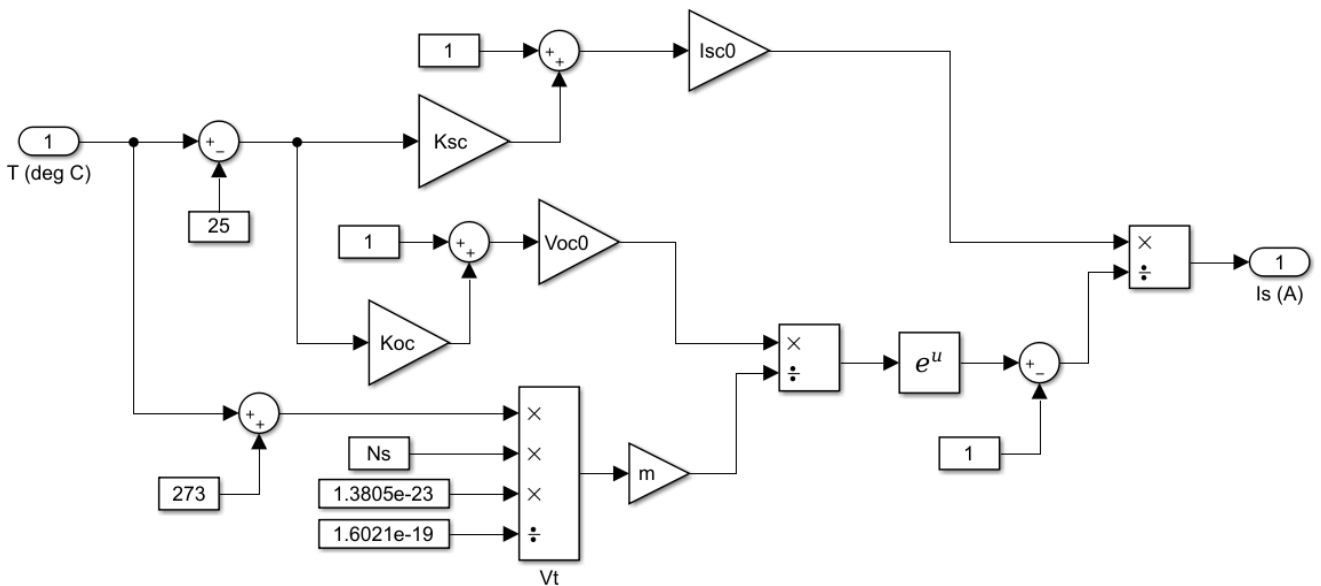


Рисунок 3.5 – Імітаційна модель внутрішньої підсистеми для моделювання струму насичення діода I_s

Імітаційна модель внутрішньої підсистеми для моделювання струму насичення діода I_s базується на виразі (3.8).

$$I_s = \frac{I_{sc0}(1 + K_I \Delta T)}{\exp\left(\frac{V_{oc0}(1 + K_V \Delta T)}{mV_T}\right) - 1}, \quad (3.8)$$

де $\Delta T = T - T_0$;

K_V – коефіцієнт зміни напруги від температури;

K_I – коефіцієнт зміни струму від температури.

На вхід імітаційної моделі внутрішньої підсистеми для моделювання струму насичення діода I_s поступає температура поверхні панелі T , а з виходу знімається струм насичення діода I_s .

Імітаційна модель внутрішньої підсистеми для моделювання струму діода I_d базується на виразі (3.9).

$$I_d = I_s \left[\exp\left(\frac{V_d}{mV_T}\right) - 1 \right] \quad (3.9)$$

де I_s – струму насичення діода;

$V_d = V + IR_s$ – діодна напруга;

V_T – напруга, яка називається тепловим потенціалом;

m – коефіцієнт, який моделює наближення діода до ідеального діода.

Імітаційну модель внутрішньої підсистеми для моделювання струму діода I_d зображено на рисунку 3.6. На вхід підсистеми поступає температура T , струм насичення діода I_s , а також струм і напруга сонячної панелі.

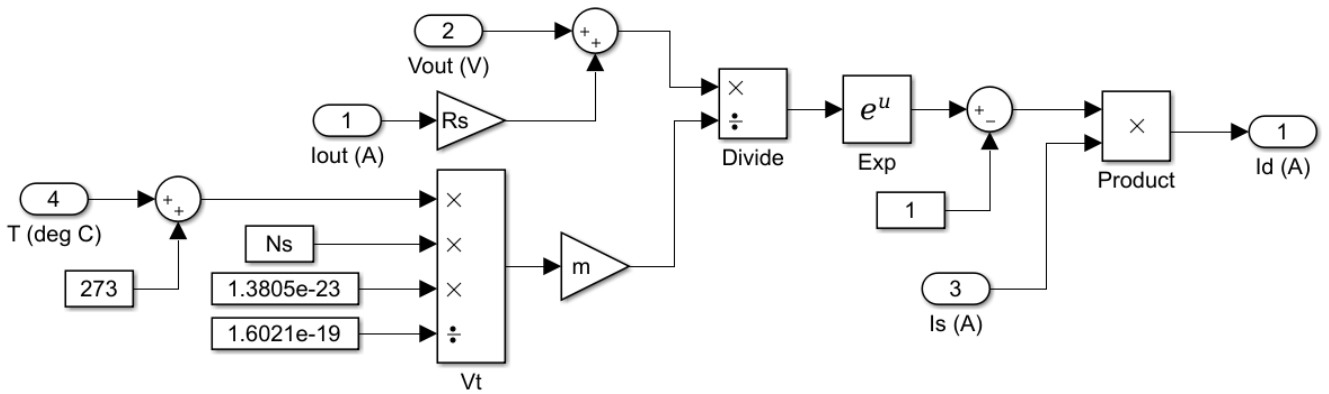


Рисунок 3.6 – Імітаційна модель внутрішньої підсистеми для моделювання струму діода I_d

Під час виконання дипломної роботи магістра отримано 4 набори даних для струму, напруги і потужності, які вимірювалися для заданих значень освітленості. На рисунку 3.7 показано співпадіння результатів імітаційного моделювання та експериментальних даних вимірювання вольт-амперних та вольт-ватних характеристик сонячної панелі.

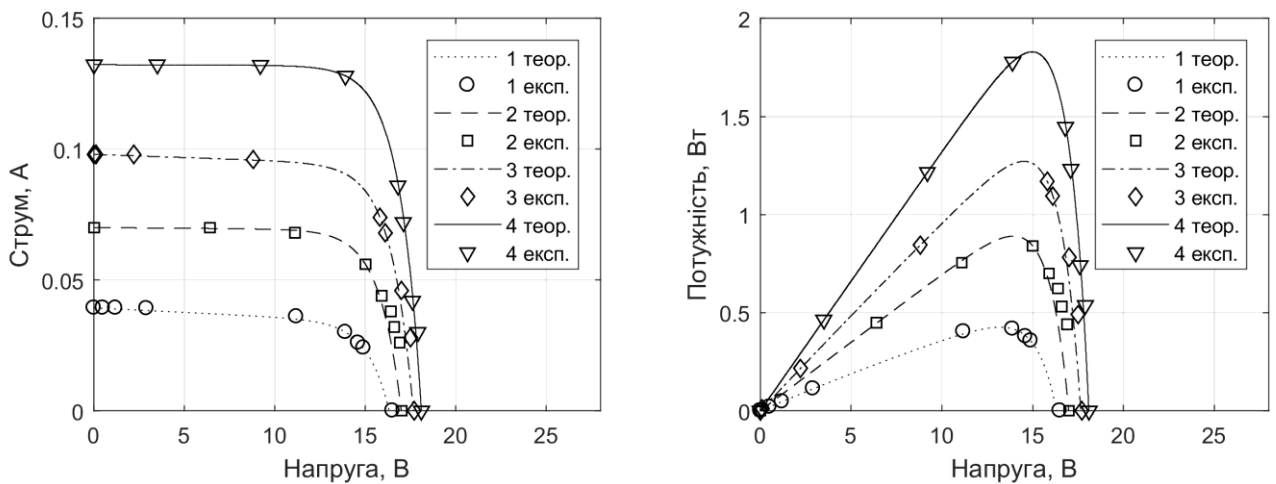


Рисунок 3.7 – Співпадіння результатів імітаційного моделювання та експериментальних даних вимірювання вольт-амперних та вольт-ватних характеристик сонячної панелі

Адекватність розробленої імітаційної моделі для побудови вольт-амперних та вольт-ватних характеристик сонячної панелі підтверджується графіками залежності абсолютної похибки струму та потужності сонячної панелі від напруги (рисунку 3.8).

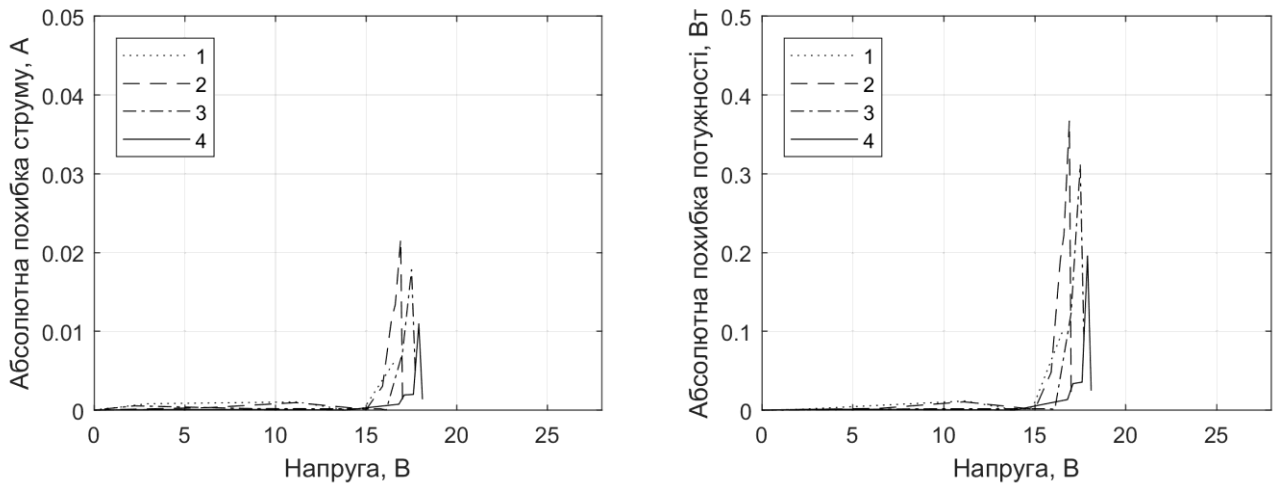


Рисунок 3.8 – Графіками залежності абсолютної похибки струму та потужності сонячної панелі від напруги

Аналізуючи графіки залежності абсолютної похибки струму та потужності сонячної панелі від напруги можна зробити висновок, що похибки імітаційного моделювання лежать в межах допустимого для інженерних розрахунків.

Висновки до третього розділу

1. В процесі моніторингу сонячних панелей запропоновано використовувати значення струму, напруги та потужності сонячної панелі у трьох точках її вольт-амперної характеристики. Першою точкою для визначення параметрів сонячної панелі є точка на її вольт-амперній характеристиці, яка відповідає режиму короткого замикання сонячної панелі. Виробники сонячних

панелей вказують струм короткого замикання I_{sc0} , який визначається у стандартних тестових умовах.

2. Основою імітаційної моделі для побудови вольт-амперних та вольт-ватних характеристик сонячної панелі є підсистеми PV Array. На вхід підсистеми PV Array надходять значення освітленості G і температури T , а з вихода підсистеми PV Array виходять електричні сигнали “Out+” та “Out-”, які повністю узгоджуються із компонентами SimPowerSystems. Також на виході підсистеми PV Array розраховується вихідний вектор вимірюваних величин m .

3. Для роботи підсистеми PV Array задаються параметри сонячної панелі I_{sc0} , V_{oc0} , K_I , K_V , m , N_s , R_s та R_{sh} , використовуючи маску підсистеми. Для моделювання навантаження сонячної панелі використовується кероване джерело струму, яке моделює лінійне зростання струму навантаження.

4. Адекватність розробленої імітаційної моделі для побудови вольт-амперних та вольт-ватних характеристик сонячної панелі підтверджується графіками залежності абсолютної похибки струму та потужності сонячної панелі від напруги

4. Експериментальне дослідження методу моніторингу сонячних панелей

4.1. Загальна структура схема системи моніторингу сонячних панелей у реальному масштабі часу

З розвитком та популяризацією технологій сонячної енергетики важливою задачею є розробка систем моніторингу з дослідження засобів та технологій даної галузі [11]. Питанням створення систем моніторингу з дослідження функціонування сонячних панелей присвячена велика кількість праць [12–14].

Частина таких праць фокусуються тільки на дослідженні окремих аспектів роботи сонячних панелей – на куті нахилу щодо джерела освітлення, інтенсивності освітлення і т.д. При цьому майже не розглядається можливість моніторингу та диспетчеризації сонячних панелей у реальному масштабі часу та одночасного отримання даних про значення їх основних функціональних параметрів.

Експериментальні дані, отримані з таких установок, дали б можливість оцінити залежність продуктивності сонячних панелей з урахуванням умов навколишнього середовища, кута нахилу сонячної панелі до джерела освітлення, інтенсивності освітлення, тощо. Також використання в системах моніторингу сонячних панелей на основі різноманітних датчиків утруднено, оскільки необхідно проводити слідування за декількома параметрами одночасно і змінювати параметри сонячних панелей.

Тому необхідно розробити систему, яка дозволяла б проводити моніторинг за станом сонячних панелей і керувати ними. Основним факторами для якісної роботи сонячних панелей є температура та рівень освітленості. У науковій роботі використано датчик температури.

Вхідними даними є номінальна напруга і номінальна потужність сонячний панелей. Наявність цих даних дозволяє з достатньою точністю розрахувати максимальну поточну потужність сонячних панелей.

Тому в роботі розроблена загальна структурна схема системи моніторингу сонячних панелей у реальному масштабі часу, яка представлена на рисунку 4.1.



Рисунок 4.1 – Загальна структура схема системи моніторингу сонячних панелей у реальному масштабі часу на основі схеми підключення мікроконтролера WeMos D1 до розумної технології OpenHab

Загальна структура схема системи моніторингу сонячних панелей у реальному масштабі часу базується на схемі підключення мікроконтролера WeMos D1 до розумної технології OpenHab, яка вимірює значення параметрів сонячної панелі таких, як напруга, сила струму, потужність за допомогою датчика PAC1710 та температури за допомогою цифрового датчика DS18520.

Для забезпечення контролю температури обрано цифровий датчик DS18B20, а для вимірювання напруги, сили струму та потужності обрано датчик PAC1710. Датчик температури дозволяє отримати температуру в діапазоні 55°C - $+125^{\circ}\text{C}$ в цифровому значенні, а для моніторингу за всіма датчиками обрано технологію розумного будинку OpenHab.

Для поєднання цих складових між собою і зчитування даних обрано плату розробника WEMOS. Використання датчика DS18B20 можливо лише разом з

мікроконтролером Arduino/Esp/Wemos, оскільки мікроконтролер повинен сприймати вихідні дані, обробляти їх і відправляти для подальшого використання.

Для реалізації автоматизованої системи моніторингу сонячних панелей було обрано наступне обладнання:

1. Плата Wemos на основі мікроконтролера ESP8266.
2. Датчик PAC1710 для вимірювання напруги, сили струму та потужності сонячних панелей.

PAC1710 - це одно- та подвійний двосторонній датчик з двостороннім током та з можливістю точного вимірювання напруги. Кожен датчик вимірює напругу, розроблену на зовнішньому сенсорі, щоб представляти струм високої сторони акумулятора або регулятора напруги. PAC1710 також вимірює напругу й обчислює середню потужність за період інтеграції.

PAC1710 можна запрограмувати для встановлення контакту, коли високі та низькі межі перевищені для струму та напруги шини. Прилад PAC1710 хороший для вимірювання динамічної потужності. Тривалий час інтеграції дозволяє продовжити цикли опитування системи, не втрачаючи інформації про споживання електроенергії. Крім того, попередження забезпечує перехоплення похідних подій між циклами опитування. Зовнішній вигляд PAC1710 представлений на рисунку 4.2.



Рисунок 4.2 – Зовнішній вигляд RAS1710

Особливості датчика RAS1710:

- 1% точність вимірювання струму в позитивний діапазон;
- вимірює напругу в межах від 0 до 40В;
- розраховує потужність;
- автоматичне нульове вхідне зміщення напруги;
- цифрове усереднення;
- регульований час вибірки та роздільна здатність;
- діапазон живлення від 3 до 5,5 В;
- широкий робочий діапазон температури: від -40°C до $+85^{\circ}\text{C}$.

3. Датчик DS18B20 - цифровий термометр з програмованим розширенням

DS18B20 – це цифровий температурний датчик, який володіє множиною корисних функцій. Фактично, DS18B20 – це цілий мікроконтролер, який може зберігати значення вимірів, сигналізувати про вихід температури за встановлені

межі (самі межі ми можемо встановлювати та змінювати), змінювати точність вимірювань, спосіб взаємодії з контролером та інше.

Це все в невеликому корпусі, який, до того ж, є доступним у водонепроникному виконанні. Мікросхема має три виходи, з яких для даних використовується тільки один, а два інших – це земля та живлення. Зовнішній вигляд DS18B20 представлений на рисунку 4.3.

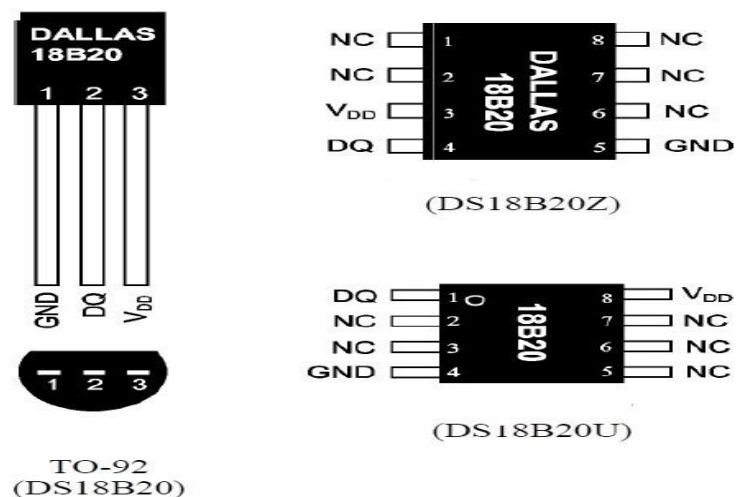


Рисунок 4.3 – Зовнішній вигляд DS18B20

Особливості цифрового датчика DS18B20:

- для інтерфейсу 1-Wire потрібно тільки один вивід порту для зв'язку;
- кожен пристрій має унікальний 64-розрядний серійний номер, що зберігається у вбудованій ROM-пам'яті;
- можливість спрощеного розподілу на одній шині безлічі датчиків температури;
- не потрібно зовнішніх компонентів;

- може живитися від лінії даних. Діапазон напруги живлення - від 3.0V до 5.5V;
- діапазон вимірюваної температури - від -55 ° C до + 125 °;
- точність вимірювання температури в діапазоні від -10°C до + 85°C ± 0.5°C;
- роздільна здатність термометра - 9 ... 12 розрядів;
- час перетворення температури при 12-розрядному дозволі – 750 ms;
- енергонезалежні налаштування сигнальних параметрів;
- команда сигнального пошуку ідентифікує і адресує пристрої, температура яких знаходиться поза заданих меж (умова температурної сигналізації).

DS18B20 застосовується в пристроях термостатичного контролю, промислових системах, споживчих виробках, термометрах або будь-яких термочутливих системах. Схема підключення датчика DS18B20 до модуля NodeMcu ESP8266 представлена на рисунку 4.4.

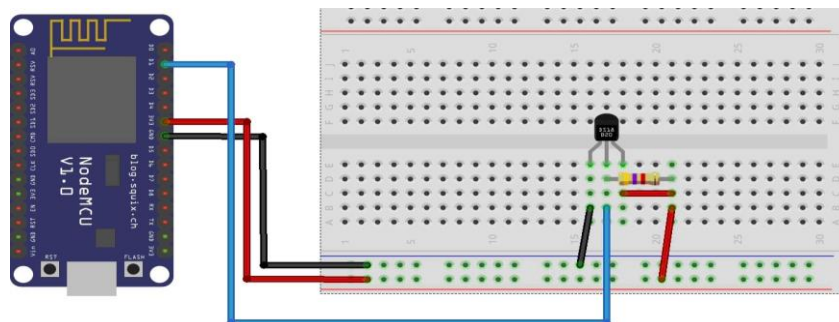


Рисунок 4.4 – Схема підключення датчика DS18B20 до модуля NodeMcu ESP8266

Однопровідний інтерфейс 1-Wire вивід датчика необхідно підтягнути до живлення резистором номіналом 4.7кОм.

Для зчитування даних датчика DS18B20 за допомогою ESP8266 будемо використовувати бібліотеку OneWire, яка повинна бути адаптована для для ESP8266 (Внесені зміни у OneWire.h).

Мікросхема ESP8266 – це мікроконтролер з інтерфейсом WiFi (рисунок 4.5), який має можливість виконувати програми з флеш-пам'яті. Пристрій було випущено в 2014 році китайською фірмою Espressif і практично відразу ж став популярним.

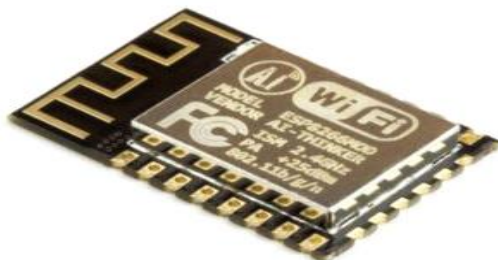


Рисунок 4.5 – Зовнішній вигляд ESP8266

Мікроконтролер ESP8266 є недорогий, володіє невеликою кількістю зовнішніх елементів і має наступні технічні параметри:

- підтримує Wi-Fi протоколи 802.11 b / g / n з WEP, WPA, WPA2;
- володіє 14 портами введення і виведення, SPI, I2C, UART, 10-біт АЦП;
- підтримує зовнішню пам'ять до 16 МБ;
- необхідна напруга живлення від 2,2 до 3,6 В, споживаний струм до 300 мА в залежності від обраного режиму.

Важливою особливістю ESP8266 є відсутність користувальницької незалежної пам'яті на кристалі. Програма виконується від зовнішнього інтерфейсу SPI постійно запам'ятовувального пристрою за допомогою динамічного завантаження необхідних елементів програми. Доступ до внутрішньої периферії можна отримати не з документації, а з API набору бібліотек.

Особливості плати ESP8266:

- зручне підключення до комп'ютера - через USB кабель, а також живлення від нього ж;

- наявність вбудованого перетворювача напруги 3,3 В;

- наявність 4 Мб флеш-пам'яті;

- вбудовані кнопки для перезавантаження і перепрошивки;

Сфери застосування модуля ESP8266.

- Автоматизація.

- Різні системи для розумного будинку.

- Мобільна електроніка.

- ID мітки.

- Mesh-мережі.

Як було зазначено вище, для моніторингу за датчиком DS18B20 та PASC1710, у роботі обрано технологію розумного будинку OpenHab. Для поєднання цих складових між собою і зчитування даних обрано плату розробника WeMos D1, яка зображена на рисунку 4.6.

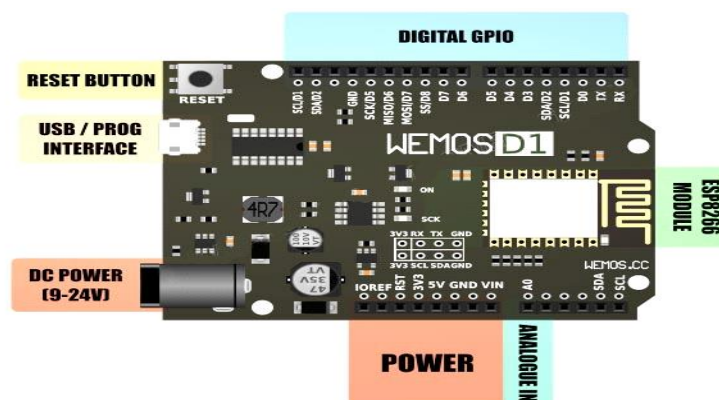


Рисунок 4.6 – Зовнішній вигляд WeMos D1

Плата WeMos D1, яка виробляється в Китаї, виконана на основі WiFi модуля ESP8266 ESP-12. На модулі є роз'єм під зовнішню WiFi антену - завдяки цьому можна розширити площу покриття мережею.

Програмування плати здійснюється за допомогою стандартного середовища розробки Arduino IDE. Мікроконтролер включає в себе процесор, периферію, оперативну пам'ять і пристрої вводу/виводу.

Найбільш часто мікроконтролер застосовується в комп'ютерній техніці, побутових приладах і інших електронних пристроях. WeMos відрізняється дешевою вартістю й простотою підключення та програмування.

Технічні характеристики WeMos:

- Вхідна напруга 3,3 В.
- 11 цифрових виходів.
- Мікро USB вихід.
- 4 Мб флеш-пам'яті.
- Наявність WiFi модуля.
- Робочі температури від -40С до 125С.

Основними областями застосування контролерів WeMos є температурні датчики, датчики тиску та інші зарядні пристрої, пульти для управління різними побутовими приладами, системи обробки даних, робототехніка.

До мікроконтролера можна підключати додаткові компоненти - індикатори, сенсори, світлодіоди, які дозволяють реалізовувати різні проекти і розширювати їх можливості.

The open Home Automation Bus (openHAB) - це відкрита технологічна платформа домашньої автоматизації. Переваги openHAB полягають у наступному:

1. Здатність інтегрувати безліч інших пристроїв і систем. OpenHAB включає в себе єдині системи домашньої автоматизації, (розумні) пристрої та інші технології.

2. Забезпечує єдиний інтерфейс користувача та загальний підхід до правил автоматизації для всієї системи, незалежно від кількості залучених виробників та підсистем.

3. Надає найбільш гнучкі інструменти, що дозволяють здійснити практично будь-яку автоматизацію дому.

Існує два способи мислення або перегляду системи автоматизації: фізичний та функціональний погляд.

Фізичний погляд - це погляд, який зосереджується на пристроях у системі автоматизації, на з'єднаннях між цими пристроями (наприклад, дроти, Z-Wave, WiFi) та інших фізичних аспектах системи.

Функціональний погляд зосереджений на тому, як інформація про пристрої, з'єднання тощо надається в інтерфейсах користувача. Функціональний погляд включає фокусування на представленні фізичних пристроїв у програмному забезпеченні. Функціональний погляд зосереджений на тому, як дія в інтерфейсі користувача впливає на програмне забезпечення, пов'язане з фізичним пристроєм, який він представляє.

4.2 Розробка алгоритму та програмного забезпечення для системи моніторингу сонячних панелей у реальному масштабі часу

Будь-яка схема для моніторингу сонячних панелей не може працювати без відповідного програмного забезпечення, розробка якого відбувається за два етапи:

- 1) Розробка алгоритму;
- 2) Розробка програми.

Для плати Wemos необхідно обрати середовище для програмування Integrated Development Environment (IDE) – інтегроване середовище розробки.

Таким середовищем обрано Arduino IDE. Arduino IDE – програмне забезпечення, що дозволяє писати свої програми (скетчі) для платформи Arduino.

Ця платформа в першу чергу орієнтується на конструкторів, які застосовують Arduino для побудови систем автоматичної і робототехніки. Програма має гнучку систему, що дозволяє реалізувати практично будь-які задуми. Arduino IDE складається з текстового редактора коду, менеджера проєктів, компілятора та модулів для завантаження прошивки в мікроконтролери. Це інтегроване середовище написане на Java і має відкритий код.

Мова програмування Arduino IDE є стандартною C++ (використовується компілятор AVR-GCC) з деякими особливостями, що полегшують написання програм.

У нашому випадку завантаження здійснюється в плату Wemos через мікросхему CH340 в контролер ESP8266.

Блок-схема алгоритму взаємодії мікропроцесорної системи керування системи моніторингу сонячних панелей з комп'ютером у реальному масштабі часу показана на рисунку 4.7.

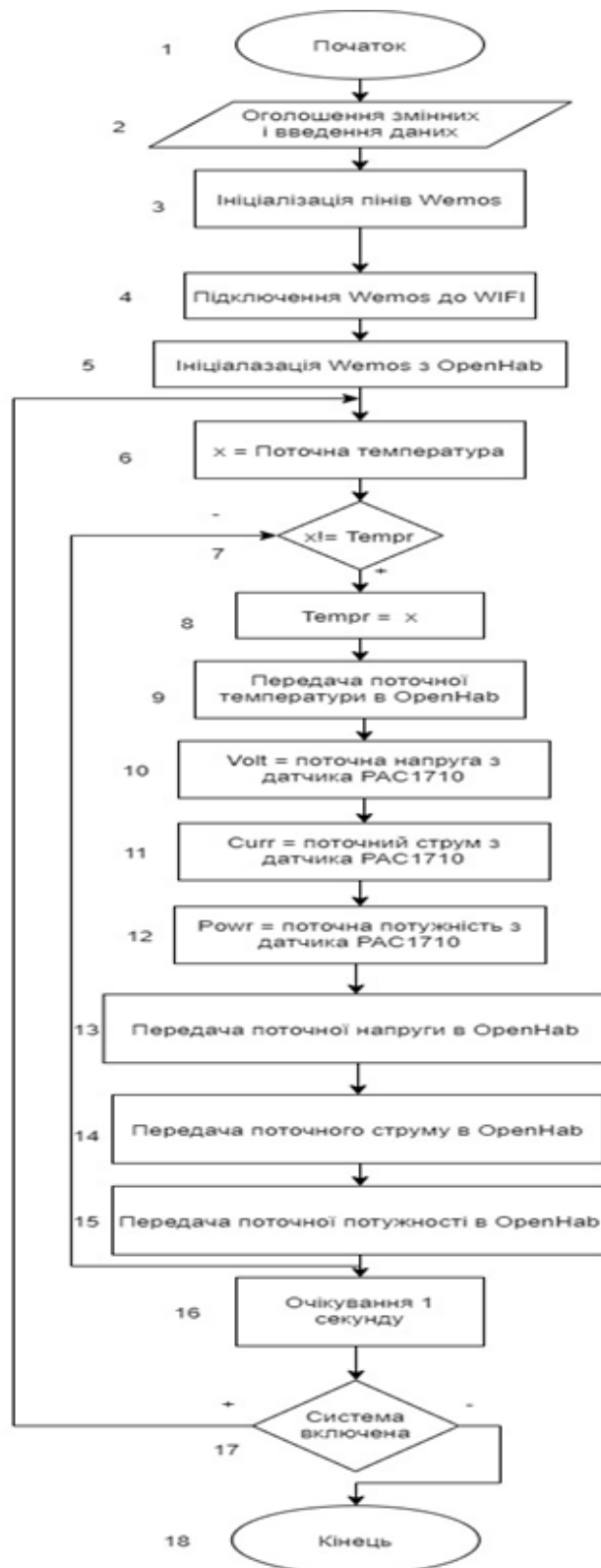


Рисунок 4.7 – Блок-схема алгоритму взаємодії мікропроцесорної системи керування системи моніторингу сонячних панелей з комп'ютером у реальному масштабі часу

Блок-схема алгоритму взаємодії мікропроцесорної системи керування системи моніторингу сонячних панелей з комп'ютером у реальному масштабі часу складається з наступних блоків.

1. Блок 1 алгоритму це початок.
2. У блоці 2 алгоритму відбувається оголошення змінних і введення

даних:

- Temp_r – температура;
- Volt – поточна напруга сонячних панелей;
- Curr – поточний струм сонячних панелей;
- WLAN_SSID – назва мережі WiFi;
- WLAN_PASS – пароль мережі WiFi;
- MQTT_SERVER – IP адреса mqtt сервера;
- MQTT_SERVERPORT – порт mqtt сервера;
- MQTT_USERNAME – ім'я для авторизації на mqtt сервера;
- MQTT_PASSWORD – пароль для авторизації на mqtt сервера;
- MQTT_TOPIC – “топiк”, на який будуть передаватися дані;
- buttonPin – пін ардуіно, який зчитує температуру.

Змінні Temp_r, Volt і Curr використовуються для обміну даними між контролером Wemos і OpenHab.

3. Блок 3 ініціалізує порти входу плати Wemos для комутації з датчиком DS18B20.

4. Блок 4 ініціалізує роботу мікроконтролера в мережі по WiFi.

5. Блок 5 ініціалізує роботу контролера з OpenHab.

6. Блок 6 зчитуємо температуру з датчика DS18B20.

7. Блок 7 Якщо поточна температура не дорівнює попередній температурі, тоді виконується блок 8, а якщо дорівнює, тоді одразу переходимо блоку 16.

8. Блок 8 $X =$ поточне значення – Temp_r.

9. Блок 9 передаємо змінну температури в OpenHab.

10. Блок 10 зчитуємо поточну напругу з датчика PAC1710.

11. Блок 11 зчитуємо поточний струм з датчика РАС1710.
12. Блок 12 зчитуємо поточну потужність з датчика РАС1710.
13. Блок 13 передаємо змінну поточної напруги в OpenHab.
14. Блок 14 передаємо змінну поточного струму в OpenHab.
15. Блок 15 передаємо змінну поточної потужності в OpenHab і переходимо до блоку 16.
16. Блок 16 чекаємо 1 секунду.
17. Блок 17 перевіряє, чи система включена, якщо умова є істиною, тоді повертаємось до блоку 6, а якщо хибною, тоді виконується блок 18.
18. Блок 18 кінець алгоритму.

Метод моніторингу сонячних панелей реалізовано із використанням сайту на сервері OpenHab.

Основне призначення сайту, що організований у OpenHab, є відображення параметрів сонячних панелей: температури, напруги, сили струму, потужності та вологості. Ці дані оновлюються кожні 10 секунд. За цими даними будуються графіки параметрів у залежності від часу. За графіками можна спостерігати, як змінювалися основні параметри виробленої електроенергії сонячною панеллю протягом дня.

У науковій роботі було розроблено апаратне та програмне забезпечення мікроконтролерної системи керування для вимірювання параметрів, що дозволяють оцінити потужність струму, що продукується сонячною панеллю. Розроблена мікропроцесорна система керування на базі плати ESP8266, яка може працювати в автономному режимі, при цьому значення параметрів виводяться на Web-сервер через мережу Інтернет.

Для підготовки даних про вимірювальні параметри сонячних панелей, отриманих з мікропроцесорної плати для відправки з робочої машини оператора на Web-сервер і подальшого опрацювання, необхідно реалізувати зв'язок між двома даними вузлами. У більшості випадків для таких задач використовують послідовний інтерфейс, що фізично реалізований з допомогою кабелю USB-MicroUSB. Послідовний інтерфейс дозволяє відправляти керуючі сигнали з

комп'ютера до мікроконтролера та отримувати дані про технологічні параметри у зворотному напрямку. Таким чином, комп'ютер зв'язується з мікроконтролером, що відповідно керує та отримує значення вимірювальних параметрів за допомогою USB-порта.

Розроблене програмне забезпечення дозволяє отримувати значення напруги, сили струму та температури, що продукується сонячною панеллю.

Висновки до четвертого розділу

1. Розроблена загальна структурна схема системи моніторингу сонячних панелей у реальному масштабі часу, яка базується на схемі підключення мікроконтролера WeMos D1 до розумної технології OpenHab. Розроблена загальна структурна схема системи моніторингу сонячних панелей у реальному масштабі часу вимірює значення параметрів сонячної панелі таких, як напруга, сила струму, потужність за допомогою датчика PAC1710 та температури за допомогою цифрового датчика DS18520.

2. Розроблена блок-схема алгоритму взаємодії мікропроцесорної системи керування системи моніторингу сонячних панелей з комп'ютером у реальному масштабі часу. Запропоновано метод моніторингу сонячних панелей реалізовано із використанням сайту на сервері OpenHab.

3. Основне призначення сайту, що організований у OpenHab, є відображення параметрів сонячних панелей: температури, напруги, сили струму, потужності та вологості. Ці дані оновлюються кожні 10 секунд. За цими даними будуються графіки параметрів у залежності від час. За графіками можна спостерігати, як змінювалися основні параметри виробленої електроенергії сонячною панеллю протягом дня.

4. Розроблено апаратне та програмне забезпечення мікроконтролерної системи керування для вимірювання параметрів, що дозволяють оцінити потужність струму, що продукується сонячною панеллю. Розроблена

мікропроцесорна система керування на базі плати ESP8266, яка може працювати в автономному режимі, при цьому значення параметрів виводяться на Web-сервер через мережу Інтернет.

ВИСНОВКИ

1. Проаналізовано та досліджено інформаційні процеси, що протікають у системах моніторингу сонячних панелей в реальному масштабі часу. Встановлено, що базова структура сонячної електростанції включає в себе чотири основні компоненти: сонячні панелі; контролер заряду; інвертор; акумуляторний блок. Дані компоненти необхідні для безперебійного функціонування сонячної електростанції.

2. Безвідмовна робота сонячних панелей і всіх елементів сонячної електростанції є необхідною умовою для ефективного виробництва електроенергії і прибутковості інвестицій у сонячну електростанцію. Щоб гарантувати тривалу безаварійну роботу, потрібен періодичний аудит (діагностика, рекомендації щодо усунення недоліків) усіх елементів сонячної електростанції.

3. В процесі вдосконалення методу моніторингу сонячних панелей необхідно враховувати властивості сонячних панелей, які відображують їх технічний стан. Крім номінальних показників технічного стану сонячних панелей, а саме вихідного струму сонячної панелі I , вихідної напруги сонячної панелі U та вихідної потужності сонячної панелі P , на якість сонячної панелі впливає зміна цих параметрів сонячної панелі внаслідок зміни освітленості та температури сонячної панелі $I(G, T)$, $U(G, T)$ та $P(G, T)$.

4. Розробка математичних моделей сонячних панелей, які найбільш точно описують вихідний струм, напругу та потужність сонячних панелей, є надзвичайно важливим для зменшення середніх ризиків моніторингу сонячних панелей.

5. В процесі моніторингу сонячних панелей запропоновано використовувати значення струму, напруги та потужності сонячної панелі у трьох точках її вольт-амперної характеристики. Першою точкою для визначення

параметрів сонячної панелі є точка на її вольт-амперній характеристиці, яка відповідає режиму короткого замикання сонячної панелі. Виробники сонячних панелей вказують струм короткого замикання I_{sc0} , який визначається у стандартних тестових умовах.

б. Розроблено апаратне та програмне забезпечення мікроконтролерної системи керування для вимірювання параметрів, що дозволяють оцінити потужність струму, що продукується сонячною панеллю. Розроблена мікропроцесорна система керування на базі плати ESP8266, яка може працювати в автономному режимі, при цьому значення параметрів виводяться на Web-сервер через мережу Інтернет.

Перелік посилань

- 1 Chouder, A.; Silvestre, S.; Taghezouita, B.; Karatepec, E. Monitoring, modelling and simulation of PV systems using LabVIEW. *Sol. Energy* 2013, 91, 337–349.
- 2 Ando, B.; Baglio, S.; Pistorio, A.; Tina, G.; Ventura, C. Sentinella: Smart Monitoring of Photovoltaic Systems at Panel Level. *IEEE Trans. Instrum. Meas.* 2015, 64, 2188–2199.
- 3 Moreno-Garcia, I.M.; Palacios-Garcia, E.J.; Pallares-Lopez, V.; Santiago, I.; Gonzalez-Redondo, M.J.; Varo-Martinez, M.; Real-Calvo, R.J. Real-Time Monitoring System for a Utility-Scale Photovoltaic Power Plant. *Sensors* 2016, 16, 770.
- 4 Costa, C.; Rodrigues, M.; Yamada, G.; Rodrigues, G.; Jiayu, X.; Moritz, G.; Goes, R.; Lazzaretti, A.; Oroski, E.; Stadzisz, P. A Monitoring and Management System for Medium-Scale Photovoltaic Plants. In *Proceedings of the IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Conference -Latin America, Gramado City, Brazil, 15–18 September 2019*; pp. 1–6.
- 5 Kurukuru, V.S.; Haque, A.; Khan, M.A.; Tripathy, A.K. Fault classification for Photovoltaic Modules Using Thermography and Machine Learning Techniques. In *Proceedings of the International Conference on Computer and Information Sciences, Aljouf, Saudi Arabia, 3–4 April 2019*; pp. 1–6.
- 6 Li, Z.; Wang, Y.; Zhou, D.; Wu, C. An Intelligent Method for Fault Diagnosis in Photovoltaic Array
- 7 Configuration of the Proposed System. In *Proceedings of the International Conference on Electrical and*
- 8 *Information Technologies, Yogyakarta, Indonesia, 19–21 September 2017*; pp. 10–16.

9 Design and development of educational technology[Электронный ресурс] / EdX.org – Режим доступа: <https://www.edx.org/course/design-development-educational-mitx-11-132x-1>.

10 Chen, Z.; Wu, L.; Cheng, S.; Lin, P.; Wu, Y.; Lin, W. Intelligent fault diagnosis of photovoltaic arrays based on optimized kernel extreme learning machine and I-V characteristics. *Appl. Energy* 2017, 204, 912–931.

11 Jackson, J. Energy monitoring of a SMME photovoltaic power system / J. Jackson, S.P D. Chowdhury // Conference: 2017 52nd International Universities Power Engineering – doi: 10.1109/UPEC.2017.8231989.

12 Kobzar, K., Shut, O., Ovsianynkova, O., Senetskyi, O. and Tretiak, O. (2016), «Analysis of causes of turbogenerators and hydrogenerators damages by the method of determination of complicated stressed state of the parts», *Bulletin of NTU «KhPI»*. Series: Power and heat engineering processes and equipment, no. 8(1180), pp. 136–142, ISSN 2078-774X, doi: 0.20998/2078-774X.2016.08.19. 17.

13 Jackson, J. Energy monitoring of a SMME photovoltaic power system / J. Jackson, S.P D. Chowdhury // Conference: 2017 52nd International Universities Power Engineering – doi: 10.1109/UPEC.2017.8231989.

14 Kyomugisha R. A Remote Solar Photovoltaic Laboratory based on the iLabs Shared Architecture (ISA) / R. Kyomugisha, D. Bomugisha, M. Mwikirize // 12th International Conference on Remote Engineering and Virtual Instrumentation (REV), 25-28 February 2015, Bangkok, Thailand. – Bangkok, Thailand, 2015. – P. 56-62.

15 Assante D. A remotely accessible photovoltaic system as didactic laboratory for electrical engineering courses / D. Assante, M. Tronconi // Global Engineering Education Conference (EDUCON), 18-20 March 2015. – Tallinn, Estonia, 2015. – P. 479-485.

16 Sapa S. The hardware of solar panels position control as part of the laboratory

bench / S. Sapa, M. Slabinoha, N. Klochko, A. Vynnychuk // Science of the third millennium, 18-29 April 2017. – Morrisville, USA, 2017. – P. 28-30.

17 Drews, A.; de Keizer, A.C.; Beyer, H.G.; Lorenz, E.; Betcke, J.; van Sark, W.G.; Heydenreich, W.; Wiemken, E.; Stettler, S.; Toggweiler, P.; et al. Monitoring and remote failure detection of grid-connected PV systems based on satellite observations. *Sol. Energy* 2007, 81, 548–564.

18 Tsanakas, J.A.; Chrysostomou, D.; Botsaris, P.N.; Gasteratos, A. Fault diagnosis of photovoltaic modules through image processing and Canny edge detection on field thermographic measurements. *Int. J. Sustain. Energy* 2015, 34, 351–372.

19 Garoudja, E.; Harrou, F.; Sun, Y.; Kara, K.; Aissa, C.; Silvestre, S. A statistical-based approach for fault detection and diagnosis in a photovoltaic system. In *Proceedings of the 6th International Conference on Systems and Control, Batna, Algeria, 7–9 May 2017*.

20 Harrou, F.; Sun, Y.; Taghezouit, B.; Saidi, A.; Hamlati, M.E. Reliable fault detection and diagnosis of photovoltaic systems based on statistical monitoring approaches. *Renew. Energy* 2018, 116, 22–37.

21 Kulkarni, R.S.; Talange, D.B. Modeling of solar photovoltaic module using system identification. In *Proceedings of the 7th International Conference on Power Systems (ICPS), Pune, India, 21–23 December 2017*; pp. 782–784.

22 Rodrigues, M.; Oroski, E.; Stadzisz, P.; Costa, C.; Lazzaretti, A.; Linhares, R.; de Goes, R. A MISO Nonlinear Model of Photovoltaic Panel Based on System Identification. In *Proceedings of the IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Conference -Latin America, Gramado City, Brazil, 15–18 September 2019*; pp. 1–6.

23 Packard, C.E.; Wohlgemuth, J.H.; Kurtz, S.R. Development of a Visual Inspection Data Collection Tool for Evaluation of Fielded PV Module Condition. *Nrel Tech. Rep.* 2012, 1, 10.

24 Madeti, S.; Singh, S. Monitoring system for photovoltaic plants: A review. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 2017, 67, 1180–1207.

25 Chouay, Y.; Ouassaid, M. An intelligent method for fault diagnosis in photovoltaic systems. In *Proceedings of the 2017 International Conference on Electrical and Information Technologies (ICEIT)*, Rabat, Morocco, 15–18 November 2017; pp. 1–5.

26 Costa, C.; Moritz, G.; Lazzaretti, A.; Machado Mulinari, B.; Ancelmo, H.; Rodrigues, M.; Oroski, E.; de Goes, R. A Comparison of Machine Learning-Based Methods for Fault Classification in Photovoltaic Systems. In *Proceedings of the IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Conference—Latin America*, Gramado City, Brazil, 15–18 September 2019; pp. 1–6.

27 Madeti, S.R.; Singh, S.N. A comprehensive study on different types of faults and detection techniques for solar photovoltaic system. *Sol. Energy* 2017, 158, 161–185.

28 Mellit, A.; Tina, G.; Kalogirou, S. Fault detection and diagnosis methods for photovoltaic systems: A review. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 2018, 91, 1–17.

29 Triki-Lahiani, A.; Bennani-Ben Abdelghani, A.; Slama-Belkhodja, I. Fault detection and monitoring systems for photovoltaic installations: A review. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 2018, 82, 2680–2692.

30 IEC61724. Photovoltaic System Performance Monitoring—Guidelines for Measurement, Data Exchange and Analysis; Standard, IEC: Geneva, Switzerland, 1998.

31 Shariff, F.; Rahim, N.A.; Hew, W.P. Zigbee-based data acquisition system for online monitoring of grid-connected photovoltaic system. *Expert Syst. Appl.* 2015, 42, 1730–1742.

32 Han, J.; Lee, I.; Kim, S.H. User-Friendly Monitoring System for Residential PV System Based on Low-Cost Power Line Communication. *IEEE Trans. Consum. Electron.* 2015, 61, 175–180.

33 Jucá, S.C.S.; Carvalho, P.C.M.; Brito, F.T. A Low Cost Concept for Data Acquisition Systems Applied to Decentralized Renewable Energy Plants. *Sensors* 2011, 11, 743–756.

34 Eke, R.; Kavasoglu, A.S.; Kavasoglu, N. Design and implementation of a low-cost multi-channel temperature measurement system for photovoltaic modules. *Measurement* 2012, 45, 1499–1509.

35 Sanchez-Pacheco, F.J.; Sotorrio-Ruiz, P.J.; Heredia-Larrubia, J.R.; Pérez-Hidalgo, F.; de Cardona, M.S. PLC-Based PV Plants Smart Monitoring System: Field Measurements and Uncertainty Estimation. *IEEE Trans. Instrum. Meas.* 2014, 63, 2215–2222.

36 Ranhotigamage, C.; Mukhopadhyay, S. Field Trials and Performance Monitoring of Distributed Solar Panels Using a Low-Cost Wireless Sensors Network for Domestic Applications. *IEEE Sens. J.* 2011, 11, 2583–2590.

37 Xiao, W.; Dunford, W.G.; Capel, A. A novel modeling method for photovoltaic cells. In *Proceedings of the Power Electronics Specialists Conference, Aachen, Germany, 20–25 June 2004; Volume 3; pp. 1950–1956.*

38 De Soto, W.; Klein, S.; Beckman, W. Improvement and validation of a model for photovoltaic array performance. *Sol. Energy* 2006, 80, 78–88.

39 Cojocariu, B.; Petrescu, C.; Stefanoiu, D. Photovoltaic Generators—Modeling and Control. In *Proceedings of the 20th International Conference on Control Systems and Computer Science, Bucharest, Romania, 27–29 May 2015; pp. 32–37.*

40 Alqahtani, A.; Marafi, S.; Musallam, B.; El Khalek, N.E.D.A. Photovoltaic

power forecasting model based on nonlinear system identification. *Can. J. Electr. Comput. Eng.* 2016, 39, 243–250.

41 Li, Y.; Su, Y.; Shu, L. An ARMAX model for forecasting the power output of a grid connected photovoltaic system. *Renew. Energy* 2014, 66, 78–89.

42 Chine, W.; Mellit, A.; Lughi, V.; Malek, A.; Sulligoi, G.; Massi Pavan, A. A novel fault diagnosis technique for photovoltaic systems based on artificial neural networks. *Renew. Energy* 2016, 90, 501–512.

43 Samara, S.; Natsheh, E. Intelligent PV Panels Fault Diagnosis Method Based on NARX Network and Linguistic Fuzzy Rule-Based Systems. *Sustainability* 2020, 12, 2011.

44 Natsheh, E.; Samara, S. Tree Search Fuzzy NARX Neural Network Fault Detection Technique for PV Systems with IoT Support. *Electronics* 2020, 9, 1087.

45 Garoudja, Elyes, E.A. An enhanced machine learning based approach for failures detection and diagnosis of PV systems. *Energy Convers. Manag.* 2017, 151, 496–513.

46 Basnet, B.; Chun, H.; Bang, J. An Intelligent Fault Detection Model for Fault Detection in Photovoltaic Systems. *J. Sens.* 2020, 2020, 6960328.

47 Yi, Z.; Etemadi, A.H. Line-to-line fault detection for photovoltaic arrays based on multi-resolution signal decomposition and two-stage support vector machine. *IEEE Trans. Ind. Electron.* 2017, 64, 8546–8556.

48 Hussain, M.; Dhimish, M.; Titarenko, S.; Mather, P. Artificial neural network based photovoltaic fault detection algorithm integrating two bi-directional input parameters. *Renew. Energy* 2020, 155, 1272–1292.

49 Kurukuru, V.S.B.; Blaabjerg, F.; Khan, M.; Haque, A. A Novel Fault Classification Approach for Photovoltaic Systems. *Energies* 2020, 13, 308.

50 Ali, M.H.; Rabhi, A.; El Hajjaji, A.; Tina, G.M. Real time fault detection in photovoltaic systems. *Energy Procedia* 2017, 111, 914–923.

Додаток А

Стаття у фаховому журналі

ISSN 2219-9365

DOI: 10.31891/2219-9365

Міжнародний науковий журнал

**ВИМІРЮВАЛЬНА ТА
ОБЧИСЛЮВАЛЬНА ТЕХНІКА
В ТЕХНОЛОГІЧНИХ
ПРОЦЕСАХ**

2020, № 1

**International scientific-technical
journal**

**MEASURING AND COMPUTING
DEVICES IN TECHNOLOGICAL
PROCESSES**

2020, Issue 1

Хмельницький 2020

Khmelnyskyi 2020

ЗМІСТ

МЕТРОЛОГІЯ, СТАНДАРТИЗАЦІЯ, СЕРТИФІКАЦІЯ ТА ВИМІРЮВАЛЬНА ТЕХНІКА В ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСАХ

YANENKO O., TKACHUK A., TKACHUK R.
AUTOMATED TESTING SYSTEM FOR IMPLANTS TO REGULATE INTRAOCULAR PRESSURE 5

ПОЛОВИНКО І.І., КАШУБА А.І.
КОЛІРНІ ПЕРЕТВОРЕННЯ КОСМОЗНІМКІВ ІЗ ВРАХУВАННЯМ ВІДБИТОГО
ТА РОЗСІЯНОГО СВІТЛА 11

МАЩЕНКО В. А.
МЕТОД ВИЗНАЧЕННЯ ДИНАМІЧНОГО КОЕФІЦІЄНТА ПУАССОНА ПОЛІМЕРНОГО АУКСЕТИКА
ЗА ДОПОМОГОЮ ТРЬОХ ТИПІВ АКУСТИЧНИХ ХВИЛЬ 16

**ЛАТЕНКО В.І., МИРОНОВ Р.Д.,
ОРНАТСЬКИЙ І.А., ЛОГВИНЕНКО Д.М.**
АЛГОРИТМ ТА ПРОГРАМА РОЗРАХУНКУ ТЕМПЕРАТУРИ
ЗА ОПОРОМ РЕЗИСТИВНОГО ТЕРМОДАТЧИКА 23

КОВТУН І. І., БОЙКО Ю. М., БАТОВСЬКИЙ В. В.
ДІАГНОСТУВАННЯ МІЦНОСТІ КОМПАУНДОВАНИХ КОНСТРУКЦІЙ ЕЛЕКТРОННОЇ ТЕХНІКИ
ПРИ ТЕРМОЦИКЛУВАННІ 28

КАРПОВА Л. В., ГОРОШКО А. В., ПИРОЖОК В. В.
СТАТИСТИЧНА ОБРОБКА РЕЗУЛЬТАТІВ ВИМІРЮВАНЬ ХАРАКТЕРИСТИК МІЦНОСТІ
КЕРАМІЧНИХ РЕЗИСТОРІВ З ПОЛІМОДАЛЬНОЮ ЩІЛЬНІСТЮ РОЗПОДІЛУ 34

КОРЕЦЬКА Л.О., ФОРКУН І.В., МЕДЗАТИЙ Д.М.
ДОСЛІДЖЕННЯ МЕТРОЛОГІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК АВТОМАТИЗОВАНОГО ЗАСОБУ
ВИМІРЮВАЛЬНОГО КОНТРОЛЮ ВОЛОГОСТІ ПАПЕРУ 41

ІНФОКОМУНІКАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ, АВТОМАТИЗАЦІЯ ТА ОБЧИСЛЮВАЛЬНА ТЕХНІКА В ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСАХ

MARTYNYUK V. V., FORKUN Y. V., FORKUN I. V., NOVAK T. O.
ARCHITECTURE OF SOLAR PANEL INTELLIGENT MONITORING SYSTEM BY MEANS OF
INDUSTRIAL CONTROLLER 46

БЕДРАТЮК Л.П., БЕДРАТЮК Г.І.
АНАЛІЗ ЯКОСТІ МЕТОДІВ МАСШТАБУВАННЯ ЗОБРАЖЕННЯ З ДОПОМОГОЮ МОМЕНТНИХ
ІНВАРІАНТІВ 51

**ГРЕСЬ О. В., РОЗОРИНОВ Г. М.,
ПІЛЬКЕВИЧ Ю. Г., КОСТЯК М. Ю., ПАРХУЦЬ Л. Т.**
ПРОГРАМНА РЕАЛІЗАЦІЯ СИСТЕМИ ПОТОКОВОГО ШИФРУВАННЯ ІНФОРМАЦІЇ НА ОСНОВІ
ДИСКРЕТНИХ ВІДОБРАЖЕНЬ 60

**ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ, АВТОМАТИЗАЦІЯ ТА ОБЧИСЛЮВАЛЬНА
ТЕХНІКА В ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСАХ**

UDK 620.91
DOI: 10.31891/2219-9365-2020-65-1-9

MARTYNYUK V., FORKUN Y., FORKUN I., NOVAK T.
Khmelnytsky national university

**ARCHITECTURE OF SOLAR PANEL INTELLIGENT MONITORING SYSTEM BY
MEANS OF INDUSTRIAL CONTROLLER**

The paper is devoted to increasing the efficiency of real-time monitoring of the basic solar panel parameters. The main disadvantage of existing solar panel monitoring systems is the inability to troubleshoot a single solar panel of large power plants. This is due to the fact that modern inverters transmit voltage, current and power data of solar panel string. To determine which particular panel has bad parameters, it is necessary to disconnect all panels in the string and check their parameters separately. Another disadvantage of existing solar panel monitoring systems is the inability to measure the temperature of each panel individually, which significantly affects the solar panel performance. The solar panel intelligent monitoring system was developed and based on using the measuring sensors. The solar panel intelligent monitoring system is connected to the Internet via Wi-Fi. The solar panel intelligent monitoring system improves the measurement accuracy of the basic solar panels parameters. The solar panel intelligent monitoring system reduces the detection time of solar panels with bad parameters and characteristics.

Keywords: solar panel, intelligent monitoring system, solar panel string, detection time, parameters.

МАРТИНЮК В. В., ФОРКУН Ю. В., ФОРКУН І. В., НОВАК Т. О.
Хмельницький національний університет

**АРХИТЕКТУРА ІНТЕЛЕКТИВНОЇ СИСТЕМИ МОНІТОРИНГУ СОНЯЧНОЇ
ПАНЕЛІ ЗАСОБАМИ ПРОМислового КОНТРОЛЕРУ**

Стаття присвячена підвищенню ефективності моніторингу основних параметрів сонячної батареї в режимі реального часу. Основним недоліком існуючих систем моніторингу сонячних панелей є неможливість усунення неполадок однієї сонячної панелі великих електростанцій. Це пов'язано з тим, що сучасні інвертори передають дані напруги, струму та потужності сонячної батареї. Щоб визначити, яка конкретна панель має погані параметри, необхідно від'єднати всі панелі в рядку та перевірити їх параметри окремо. Ще одним недоліком існуючих систем моніторингу сонячних панелей є неможливість вимірювати температуру кожної панелі окремо, що суттєво впливає на продуктивність сонячної панелі. Інтелектуальна система моніторингу сонячних панелей була розроблена і базується на використанні вимірювальних датчиків. Інтелектуальна система моніторингу сонячних панелей підключена до Інтернету через Wi-Fi. Інтелектуальна система моніторингу сонячних панелей покращує точність вимірювання основних параметрів сонячних панелей. Інтелектуальна система моніторингу сонячних панелей зменшує час виявлення сонячних панелей з поганими параметрами та характеристиками.

Ключові слова: сонячна панель, інтелектуальна система моніторингу, рядок сонячних панелей, час виявлення, параметри.

Introduction. The trouble-free operation of solar panels and all elements of a solar power plant is a prerequisite for efficient electricity production and a profitable investment in a solar power plant. To ensure long trouble-free operation, periodic audits (diagnostics, defect recommendations) of all elements of a solar power plant are required.

Detecting defective and finding inefficient solar panels with reduced efficiency affects the level of electricity generation during the operation of a solar station. If the solar panels are connected in series, the failure of one of the elements can lead to partial or total loss of power of the entire solar power plant. In addition, due to the fact that solar panels are made up of a large number of semiconductor cells, the generation of heat in a faulty element can lead to the destruction of neighboring elements, the problem will grow over time. Therefore, it is necessary to identify defective solar panels on time, which will allow them to be quickly replaced. This will maximize system life and maximize efficiency.

For timely detection of defective solar panels, it is necessary to continuously monitor the performance of the equipment, which allows timely detection of disturbances in the operation of solar panels, as well as control access to individual modules.

The solar monitoring system consists of modules that record the signals of current, voltage and temperature sensors of individual solar panels, as well as sensors of wind speed, position of the Sun, door sensors or sensors of unauthorized access to network inverters. The system modules are connected to a local controller, which in turn is connected to a higher level controller via a Modbus RS485 or CAN bus. Modular construction provides high configuration flexibility and system expansion. Thanks to this module they are suitable for use both in big power solar plants and in small power solar plants.

Monitoring is also important because during the day there may be a sharp drop in power, which may be due

to various factors, such as shading the solar panel with certain objects or contamination of the solar panel surface (leaves, snow and dust).

By analyzing the solar panel monitoring systems, we can point out some draw-backs, such as the inability to measure the parameters of each solar panel separately, since most existing systems connect to the inverter and measure the main characteristics of the entire string, the high cost of such a system, and the inability to measure the temperature.

The renewable energy monitoring system (REMS) is proposed in [1]. The main advantages of REMS are the concept of an open source and low-cost data acquisition and transmission system using multi-user cloud remote monitoring. The REMS architecture is based on the Internet of Things (IoT) and Cloud computing principles. The REMS consists of three main parts: San USB microcontroller, Raspberry Pi (Rpi) Embedded Linux System (ELS) and Online Web Monitor for real-time cloud monitoring.

Another solar monitoring system is designed with the help of Lab VIEW and DAQ card and presented in [2]. The solar panel is connected to the battery and then with sensors. The proposed system is connected by four sensors with Lab VIEW via DAQ hardware to acquire data. Lab VIEW has shown a high performance in communicating with several devices simultaneously and high capability of displaying several variables behavior at a time.

The solar monitoring system proposed in [3] is developed to get information on the defected solar panels for timely repair and maintenance. This system can be used up to 146 V and 15.5 A solar cell systems with an automatic selection of best resolutions.

Lab-VIEW based real-time interface system in paper [4] presents the detailed characterization of the performance and dynamic behavior of photovoltaic systems. They developed a software tool that integrates several types of instruments into a single system which can offer online measurements of all data sources and compare simulation results with monitored data in real-time. The proposed method provides a fast, secure and reliable system by making the system database-ready for performance analysis of the PV systems. The integration methodology of robust simulation and monitoring data in real-time can be used to study the fault diagnosis of a PV system.

To solve the current problem of monitoring photovoltaic (PV) systems especially for regions in developing countries or remote areas; an Arduino based open-source electronic platform data logger was developed [5]. This data logger meets the International Electro technical Commission (IEC) standards requirements with a resolution of 18-bits, including 8 analog inputs for measuring up-to 8 PV modules. They mentioned that these data logger can be customized for the specific needs of each project.

The remote intelligent monitoring system [6] is based on Tiny OS for monitoring and management for PV power generation. This system had implemented remote monitoring and reverse control by the host computer, ARM gateways, wireless sensor networks, and other components.

A simple sensor-based microcontroller data acquisition system for monitoring the temperature data in solar installations is presented in [7]. The system can easily change the date; time of experiment start and end, sampling rate and deals correctly with corruption such as power failure. The proposed data acquisition system can handle up to 16 sensors, has user interface system (4 buttons LCD screen), own storage systems such as flash memory or SD card; therefore, it doesn't require any external computer to store the sensors data. This system automatically creates a new file on the SD card every day and records data on it and data can be handled and analyzed easily by any mathematical software such as Excel or MATLAB. The system monitors the sensors remotely by using the internet.

The Smart Remote monitoring system is presented in [8] which is using IOT that can monitor the Solar PV PCU and stores data in the cloud database through an easily manageable web interface. The proposed system has flexibility by using GPRS technology to interconnect the Solar PV Power Conditioning Unit to the Remote server.

Paper [9] presents the solar cell data acquisition system. The solar cell is characterized by impedance which depends on environmental conditions. The solar cell data acquisition system is designed to measure the impedance of the solar cell. These impedance measurements are also used in the electrochemical capacitor quality control [10]. The experimental Nyquist plot was fitted by using the improved expression for impedance of the solar cell.

Solar panel intelligent monitoring system block diagram. The proposed solar panel intelligent monitoring system is based on the WiFi ESP8266 Development Board WEMOS D1. The WEMOS D1 board can be configured to work on Arduino environment using BOARDS MANAGER. The PAC1710 sensor is used to measure the voltage, current and power of the solar panel. This sensor measures the voltage developed across an external sense resistor to represent the high-value current of the solar panel. The PAC1710 also measures the voltage and calculates the average power over the integration period. The long integration time allows for solar panel intelligent monitoring system polling cycles without losing any power information.

The PAC1710 sensor is used because its maximum measured voltage is 40 V. Usually, the solar panel maximum voltage is less than 40 V. The main advantage of the PAC1710 sensor is capability to measure voltage, current and power of the solar panel without using additional current and power sensors. I2C bus is used to transmit the voltage, current and power data to the WEMOS D1 board.

The DS18B20 digital thermometer is used for the temperature measurements. The DS18B20 communicates over a 1-Wire bus that by definition requires only one data line (and ground) for communication with WEMOS D1

board. The measured temperature range for the DS18B20 digital thermometer is from -55°C to $+125^{\circ}\text{C}$. This temperature range corresponds to the solar panel operation temperature range. The solar panel intelligent monitoring system block diagram is shown in figure 1.

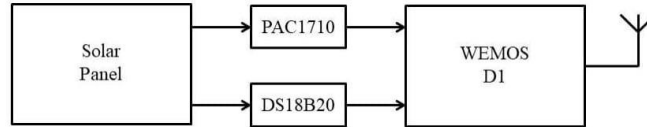


Figure 1. Solar panel intelligent monitoring system block diagram

The solar panel intelligent monitoring system was designed as the prototype print-ed circuit board (PCB) with the PAC1710 sensor and the resistor shunt. The solar panel current passes through the resistor shunt and creates the voltage drop on it. The PCB is connected to the WEMOS D1 board and shown in figure 2.

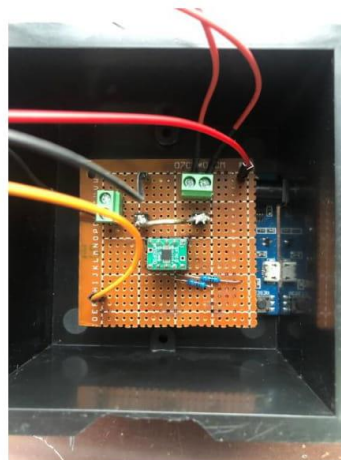


Figure 2. Solar panel intelligent monitoring system PCB

The voltage, current, power and temperature data of the solar panel are sent via WiFi to the open Home Automation Bus (openHAB). OpenHAB is an open source, technology agnostic home automation platform which runs as the center of the smart home. The openHAB's strength is its ability to integrate a multitude of other devices and systems. Also openHAB includes other home automation systems, (smart) devices and other technologies in a single solution. OpenHAB provides a uniform user interface and a common approach to automation rules across the entire system, regardless of the number of manufacturers and sub-systems involved.

Solar panel intelligent monitoring system software algorithm. The solar panel intelligent monitoring system software algorithm consists of the following steps. The flowchart of the solar panel intelligent monitoring system software is shown in figure 3.

The first step is the declaration of variables and data input:

Tempr is temperature; Volt is the solar panel voltage; Curr is the solar panel current; WLAN_SSID is the WiFi network name; WLAN_PASS is the WiFi network password; MQTT_SERVER is the IP address of MQTT server; MQTT_SERVERPORT is the MQTT server port; MQTT_USERNAME is the name for authorization on MQTT server; MQTT_PASSWORD is the password for authorization on MQTT server; MQTT_TOPIC is the "topic" to which data will be transferred; buttonPin is the Arduino pin that reads temperature. The Tempr, Volt, and Curr variables are used to exchange data between the WEMOS D1 board and OpenHAB.

The second step is the initialization of WEMOS D1 board ports for connection with the DS18B20 digital thermometer.

The third step is the initialization of the WEMOS D1 board on the WiFi network and its operation with OpenHAB.

The fourth step is the transfer procedure for the temperature, current, voltage and power data from the sensors to the WEMOS D1 board and to OpenHAB.

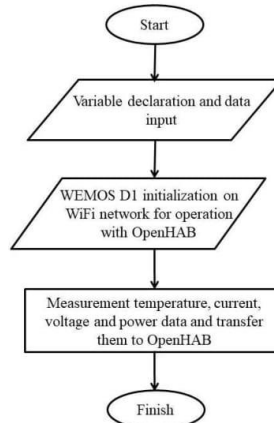


Figure 3. Flowchart of the solar panel intelligent monitoring system algorithm

The main aim of the OpenHab website is to display the parameters of the solar panel such as temperature, voltage, current and power. These data are updated every 10 seconds. According to these data, graphs of parameters are plotted versus time. The OpenHAB website is shown in figure 4.



Figure 4. OpenHab website

Experimental setup of solar panel intelligent monitoring system. The experimental setup of solar panel intelligent monitoring system is shown in figure 5.

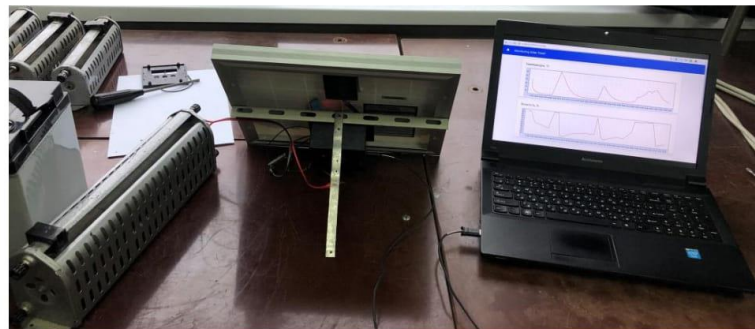


Figure 5. Experimental setup of solar panel intelligent monitoring system

The experimental setup of solar panel intelligent monitoring system consists of the solar panel ALM-10M, the prototype printed PCB with the PAC1710 sensor and the resistor shunt, WEMOS D1 board, DS18B20 digital thermometer which are mounted on the reverse side of the solar panel. To confirm the operation of the solar panel intelligent monitoring system the rheostat was connected to the solar panel as load. By changing the rheostat resistance the operation of the solar panel intelligent monitoring system was confirmed. Figure 6 shows dependences of voltage, current and power versus time at the rheostat resistance change.

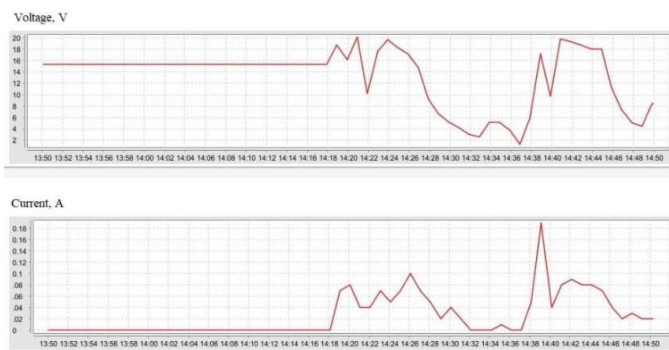


Figure 6. Dependences of voltage, current and power versus time at the rheostat resistance change

Conclusions. The solar panel intelligent monitoring system was developed using OpenHab home automation technology platform. The solar panel intelligent monitoring system connects via Wi-Fi to track real-time energy generation from anywhere on the globe via a computer or smartphone connected to the Internet. By using the solar panel intelligent monitoring system the measurement accuracy of the solar panel parameters was increased. The solar panel intelligent monitoring system reduces the detection time of panels with bad parameters and characteristics.

To prepare data on the solar panel measurement parameters obtained from the WEMOS D1 board for sending from the operator's computer to the Web server and for further processing, it is necessary to establish a connection between these two nodes. In most cases, such tasks use a serial interface that is physically implemented using a USB-MicroUSB cable. The serial interface lets us send control signals from operator's computer to the WEMOS D1 board and retrieve process information backwards. In this way, the computer communicates with the WEMOS D1 board, which accordingly manages and receives the measurement parameters using the USB port. The developed software allows obtaining values of voltage, current and temperature produced by the solar panel.

References

1. S. Adhya, D. Saha, A. Das, J. Jana, H. Saha, "An IOT based smart solar photovoltaic remote monitoring and control unit", 2nd International Conference on Controle, Instrumentation, Energy & Communication (CIEC) (2016).
2. O. Chicochan, A. Saokaew, E. Boonchieng, "Internet of Things (IOT) for smart solar energy: A case of study of the smart farm of Maejo University", International Conference on Controle, Automation and Information Sciences (ICCAIS) (2017).
3. R. I. S. Pereira, I. M. Dupont, P. C. M. Carvalho, S. C. S. Jucá, "IoT embedded Linux system based on Raspberry Pi applied to realtime cloud monitoring of a decentralized photovoltaic plant", Measurement 114 (2018) 286-297.
4. M. D. Phung, M. De La Villefromoy, Q. Ha, "Management of solar energy in micro grids using IoT-based dependable control" 20th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS) (2017).
5. K. Naga Venkatarao, K. Vijay Kumar, "An IoT Based Smart Solar Photo Voltaic Remote Monitoring", International Journal of Engineering Technology, Management and Research (IJMETMR) (2017).
6. Jongbae Kim, Jinsung Byun, Daebeom Jeong, Myeong-in Choi, Byeongkwan Kang, Se-hyun Park, "An IoT-Based Home Energy Management System over Dynamic Home Area Networks", International Journal of Distributed Sensor Networks, vol. 11, no. 10, Jan (2015).
7. S. Adhya, D. Saha, A. Das, J. Jana and H. Saha, "An IoT based smart solar photo voltaic remote monitoring and control unit", 2016 2nd International Conference on Control, Instrumentation, Energy & Communication (CIEC), Kolkata, pp. 432-436. (2016).
8. B. Shrihariprasath and V. Rathinasabapathy, "A smart IoT system for monitoring solar PV power conditioning unit", 2016 World Conference on Futuristic Trends in Research and Innovation for Social Welfare (Startup Conclave), Coimbatore, pp. 1-5, (2016).
9. V. Martynyuk, M. Fedula, R. Petrus, D. Makaryshkin and L. Kovtun, "Solar cell data acquisition system", 10th IEEE International Conference on Intelligent Data Acquisition and Computing Systems: Technology and Applications (IDAACS'2017), Metz, France, pp.140-146 (2019).
10. V. Martynyuk, M. Fedula, M. Ortigueira and O. Savenko "Methodology of Electrochemical Capacitor Quality Control with Fractional Order Model", AEU - International Journal of Electronics and Communications, V. 91, pp. 118-124 (2018).

Надійшла / Paper received: 22.02.2020

Надрукована / Paper Printed : 05.06.2020

Додаток Б
Презентація

1

ДИПЛОМНА РОБОТА НА ТЕМУ:

Метод моніторингу сонячних панелей

Виконав
ст. гр. ТРМ-19-1
Т.О. Новак

Науковий керівник
д.т.н., проф.
Мартинюк В. В.

Актуальність теми. Актуальність роботи обумовлена проблемою моніторингу кожної панелі сонячної електростанції окремо, а не в сукупності 20 панелей у стрінгу, як це здійснюється в сучасних інверторах, які передають дані про напругу, струм та потужність у цього стрінгу в цілому.

Мета і завдання дослідження. Метою дослідження є підвищення ефективності систем моніторингу сонячних панелей шляхом розробки алгоритму взаємодії їх мікроконтролерної системи керування та комп'ютера в реальному масштабі часу.

Для досягнення цієї мети необхідно розв'язати такі завдання:

- розробити структурну схему системи моніторингу сонячних панелей у реальному масштабі часу;
- розробити алгоритм взаємодії мікропроцесорної системи керування системи моніторингу сонячних панелей з комп'ютером у реальному масштабі часу;
- удосконалити метод моніторингу сонячних панелей.

•**Об'єкт дослідження** – процес моніторингу сонячних панелей.

•**Предмет дослідження** – удосконалення методу моніторингу сонячних панелей.

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

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

- 1. Удосконалено метод моніторингу сонячних панелей, який відрізняється від існуючих методів тим, що запропоновано алгоритм взаємодії мікропроцесорної системи керування засобів моніторингу сонячних панелей з комп'ютером у реальному масштабі часу, який забезпечує підвищення енергетичної ефективності технологічного процесу виробництва електричної енергії.

•**Практичне значення.** У роботі розроблена система моніторингу сонячних панелей у реальному масштабі часу на основі використання вимірювальних датчиків. Така вбудована система віддаленого моніторингу підключається через Wi-Fi та дозволяє відслідковувати покази генерації енергії в реальному масштабі часу з будь-якої точки планети за допомогою комп'ютера або смартфона, які під'єднані до глобальної мережі Інтернет. Використання такої системи дозволяє підвищити точність вимірювання основних параметрів сонячних панелей, а також зменшити час виявлення панелей із погіршеними параметрами та характеристиками.

Узагальнена структурна схема автономної сонячної електростанції

3

- **Автономна сонячна електростанція** не під'єднана до центральної електромережі і використовується тоді, коли фізично немає можливості підключитись до ліній електропередач або дана процедура економічно не вигідна.

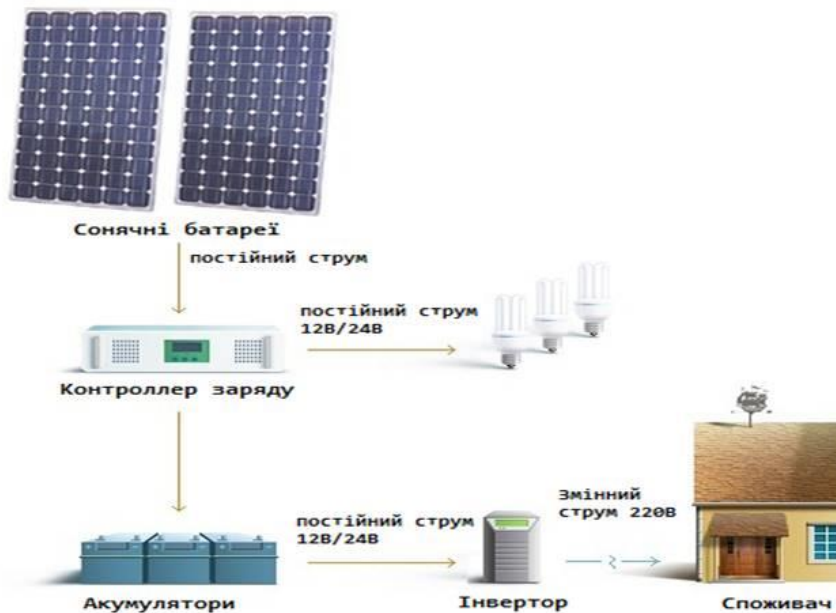


Рисунок 1 – Структурна схема автономної сонячної електростанції

Загальна структура схема системи моніторингу сонячних панелей у реальному масштабі часу ⁴

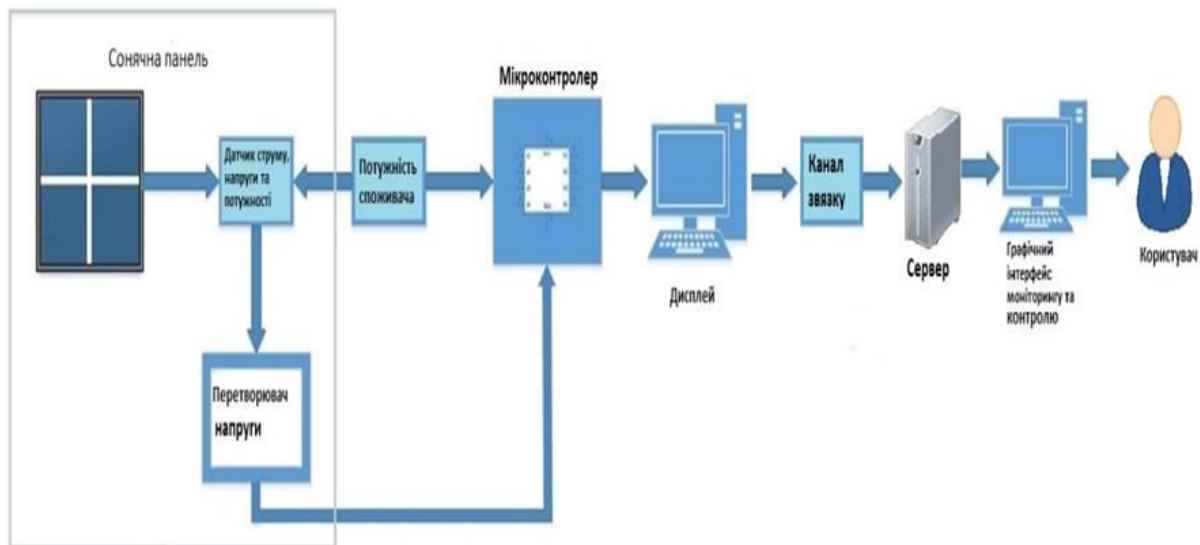


Рисунок 2 - Загальна структура схема системи моніторингу сонячних панелей у реальному масштабі часу

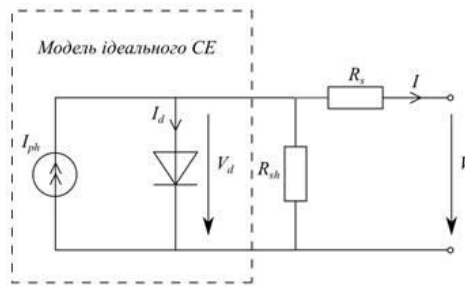


Рисунок 3 - Еквівалентна схема заміщення фотоелектричного перетворювача

Джерело фото струму створює на виході фотоелектричного перетворювача струм I_{ph} та напругу V . Залежність між струмом I та напругою V описується рівнянням (1).

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

Залежності струму фотоелектричного перетворювача та потужності фотоелектричного перетворювача від напруги на його виході

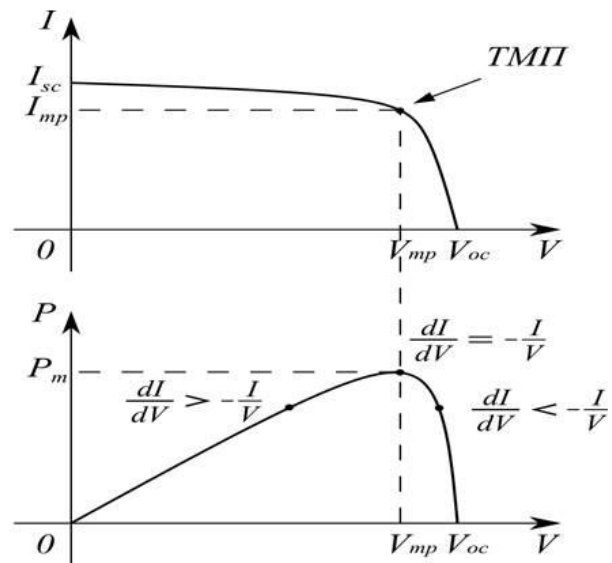


Рисунок 4 – Залежності струму фотоелектричного перетворювача та потужності фотоелектричного перетворювача від напруги на його виході

Удосконалений метод моніторингу сонячних панелей

7

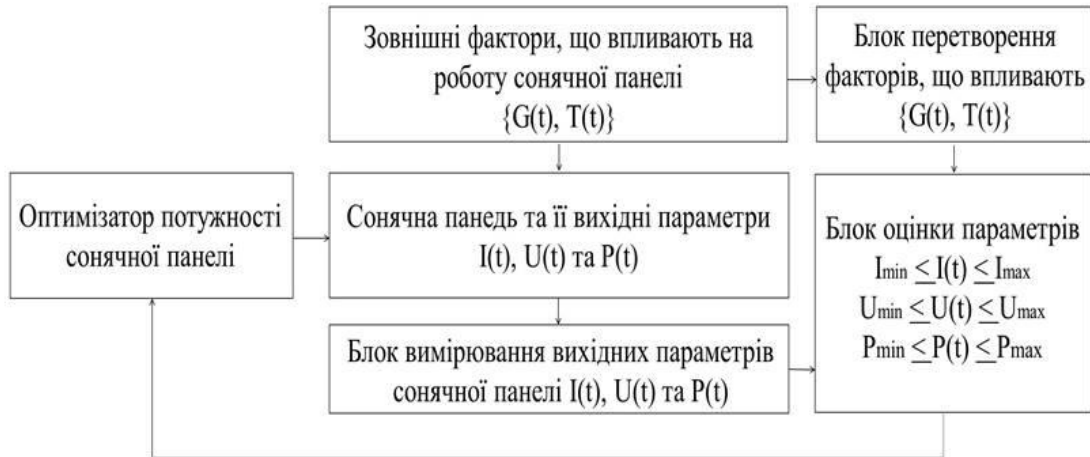


Рисунок 5 - Загальна структурна схема системи моніторингу сонячних панелей

Висуваються дві гіпотези.

1. Основна гіпотеза H_0 (сонячна панель придатна)

$$H_0: I \in [I_H, I_B] \cap U \in [U_H, U_B] \cap P \in [P_H, P_B] \quad (2)$$

2. Альтернативна гіпотеза H_1 (сонячна панель непридатна)

$$H_1: I \notin [I_H, I_B] \cap U \notin [U_H, U_B] \cap P \notin [P_H, P_B] \quad (3)$$

7

Підвищення достовірності удосконаленого методу моніторингу сонячних панелей 8

Виберемо математичні моделі сонячної панелі $i_M(G(t), T(t))$, $u_M(G(t), T(t))$ та $p_M(G(t), T(t))$ такими, щоб вони задовольняли критеріям рівномірного наближення в діапазонах зміни зовнішніх впливних факторів: рівня освітленості $G(t)$ та температури $T(t)$ сонячної панелі відповідно. Визначимо середні ризики моніторингу сонячних панелей для наступних функцій втрат

$$\begin{aligned}\eta_u &= |u_e(G(t), T(t)) - u_M(G(t), T(t))|^k; \\ \eta_i &= |i_e(G(t), T(t)) - i_M(G(t), T(t))|^k; \\ \eta_p &= |p_e(G(t), T(t)) - p_M(G(t), T(t))|^k;\end{aligned}\quad (4)$$

Середні ризики моніторингу сонячних панелей

$$\begin{aligned}\bar{\Psi}_u &= \int_{u \in U} |u_e(G(t), T(t)) - u_M(G(t), T(t))|^k f_u(u) du \leq \int_{u \in U} m_u^k f_u(u) du = m_u^k \\ \bar{\Psi}_i &= \int_{i \in I} |i_e(G(t), T(t)) - i_M(G(t), T(t))|^k f_i(i) di \leq \int_{i \in I} m_i^k f_i(i) di = m_i^k \\ \bar{\Psi}_p &= \int_{p \in P} |p_e(G(t), T(t)) - p_M(G(t), T(t))|^k f_p(p) dp \leq \int_{p \in P} m_p^k f_p(p) dp = m_p^k\end{aligned}\quad (5)$$

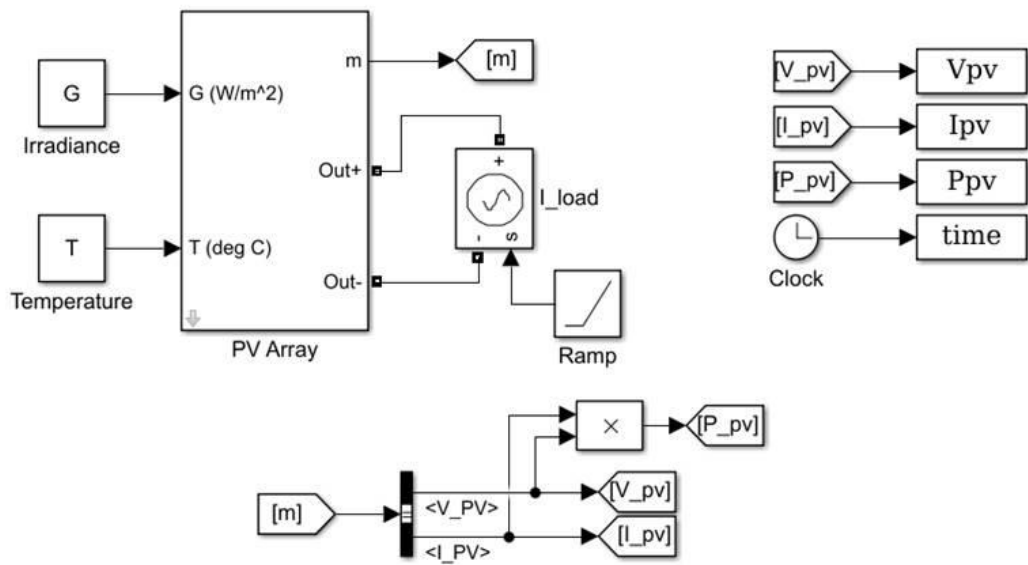


Рисунок 6 – Імітаційна модель для побудови вольт-амперних та вольт-ватних характеристик сонячної панелі

Результати імітаційного моделювання вимірювання вольт-амперних та вольт-ватних характеристик сонячної панелі

10

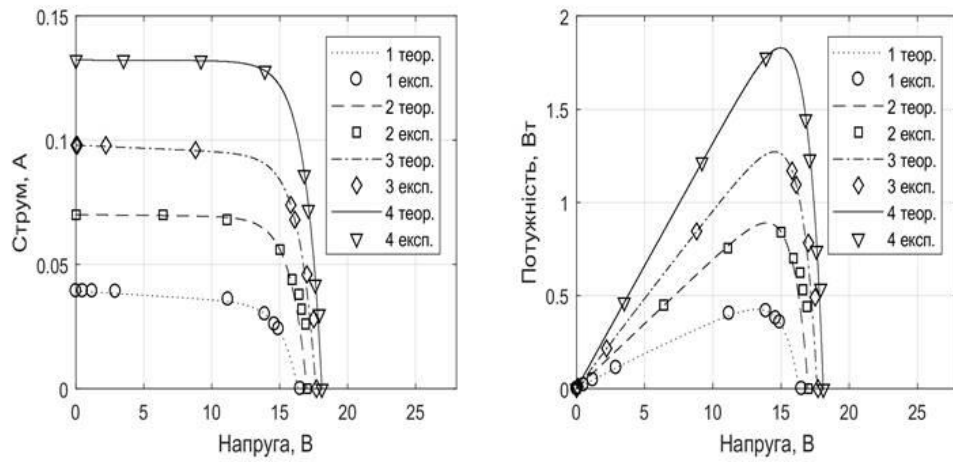


Рисунок 7 – Співпадіння результатів імітаційного моделювання та експериментальних даних вимірювання вольт-амперних та вольт-ватних характеристик сонячної панелі

10

Загальна структура схема системи моніторингу сонячних панелей у реальному масштабі часу на основі схеми підключення мікроконтролера WeMos D1 до розумної технології OpenHab



Рисунок 8 – Загальна структура схема системи моніторингу сонячних панелей у реальному масштабі часу

Блок-схема алгоритму взаємодії мікропроцесорної системи керування системою моніторингу сонячних панелей з комп'ютером у реальному масштабі часу

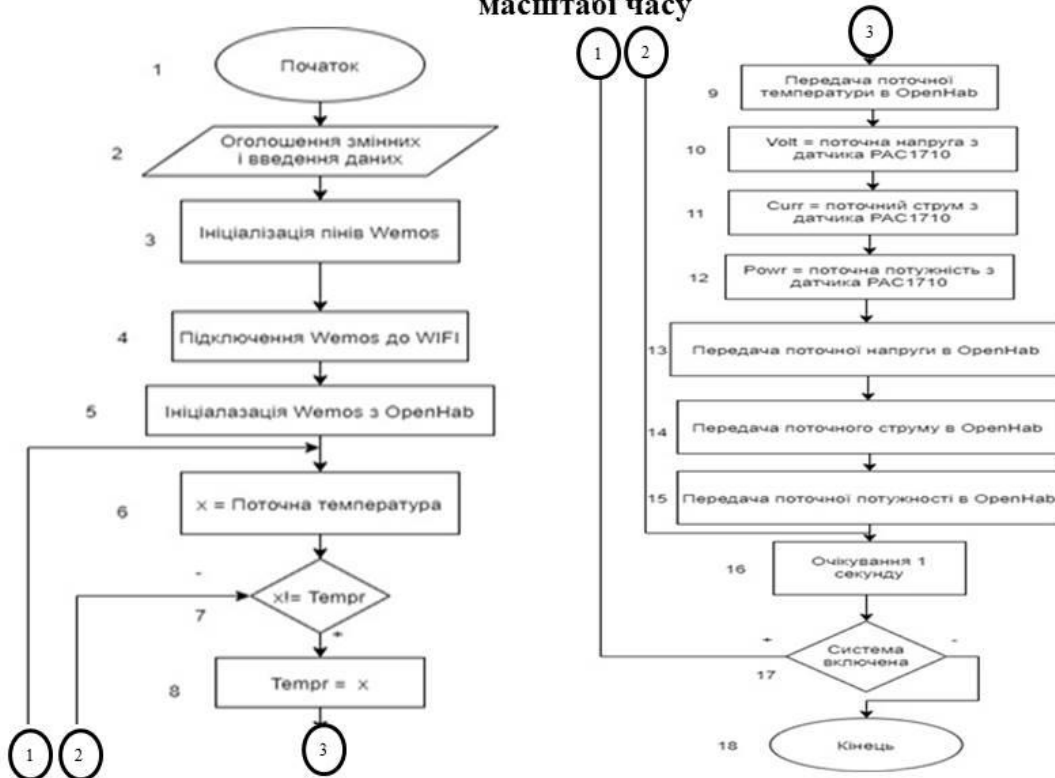
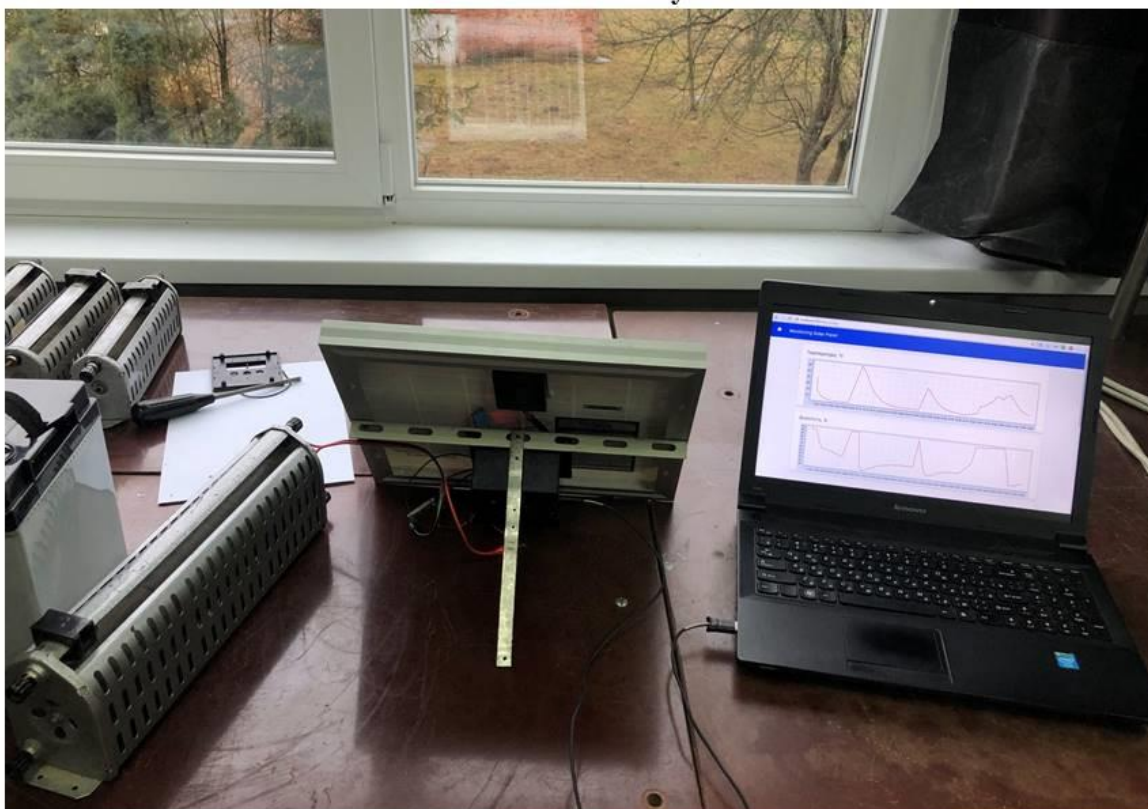


Рисунок 9 – Блок-схема алгоритму взаємодії мікропроцесорної системи керування системою моніторингу сонячних панелей

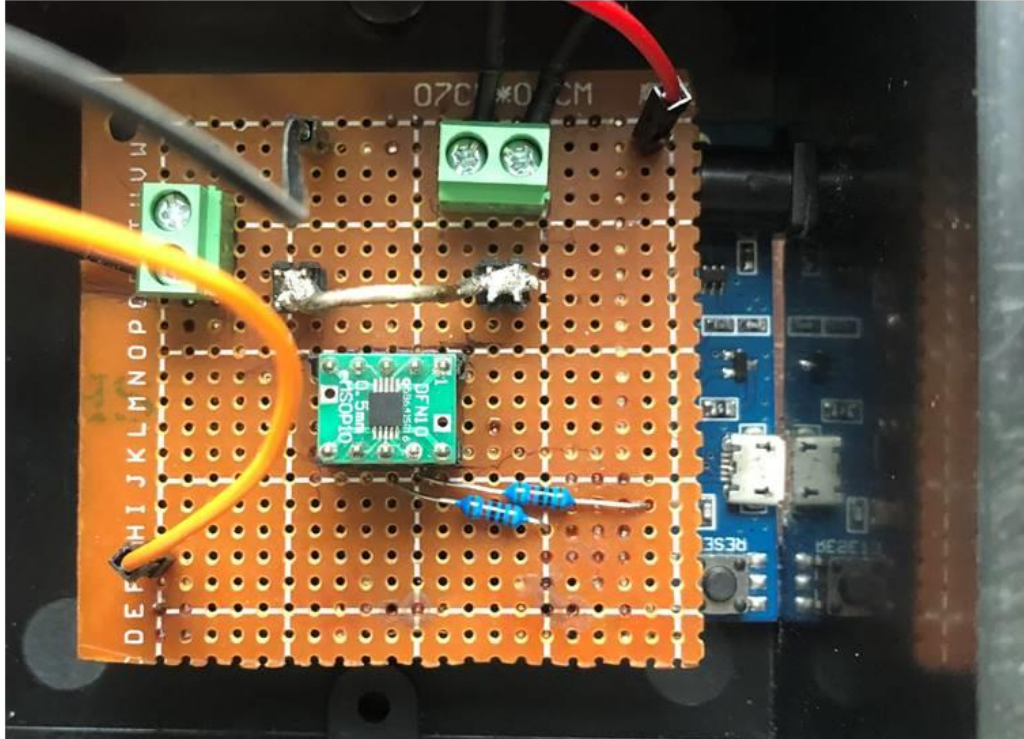
Фотографія системи моніторингу сонячних панелей в реальному масштабі часу

13



13

Фотографія макетної плати системи моніторингу сонячних панелей в реальному масштабі часу ¹⁴

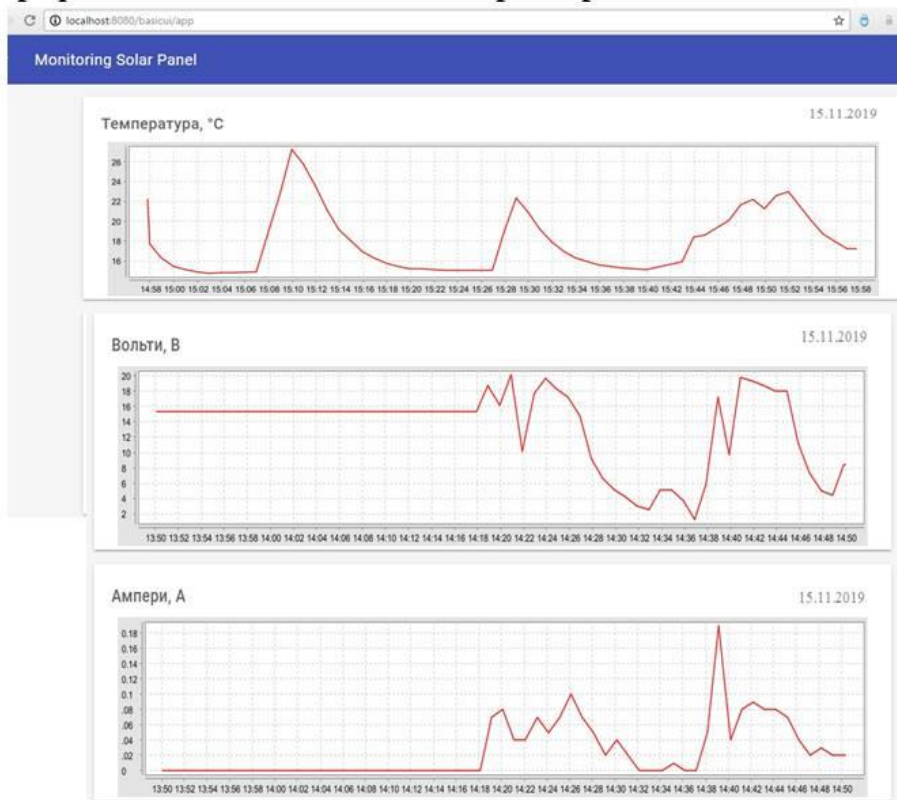


14

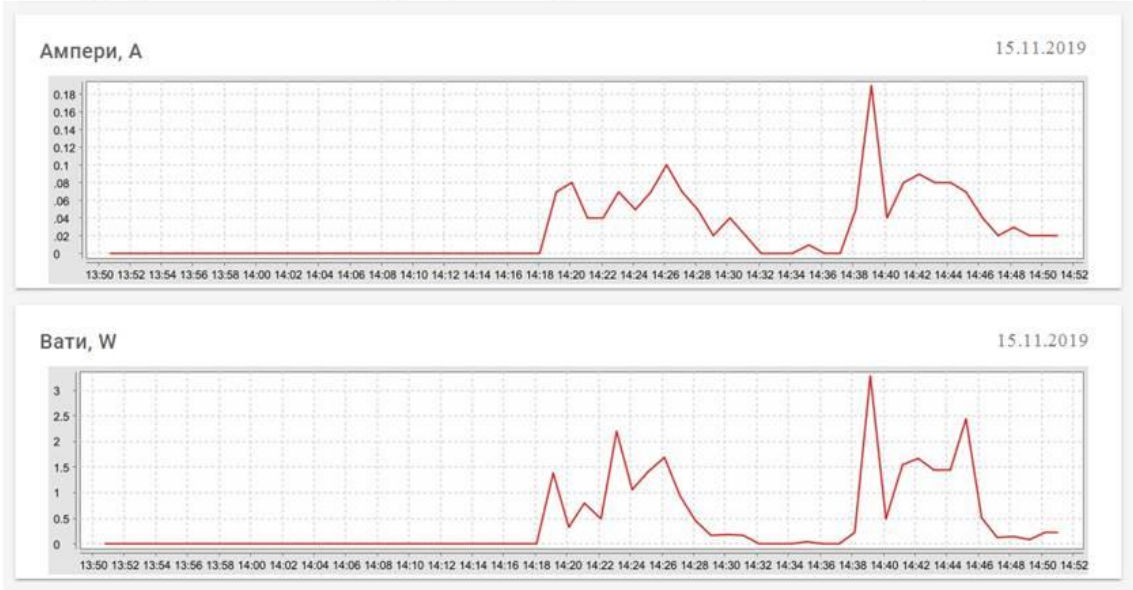
The screenshot displays the openHAB Control interface. On the left is a sidebar menu with the following items: Control (selected), Inbox, Configuration, Add-ons, and Preferences. The main content area has an orange header with the word "Control" and a refresh icon. Below the header, there are two data panels. The first panel, titled "DHT-11", shows "Температура" at 20.0 °C and "Вологість повітря" at 45.0 %. The second panel, titled "Electricity", shows "Напруга" at 18.6 В, "Струм" at 0.080 А, and "Вати" at 1.440 W. A "Paper UI" label is visible at the bottom left of the interface.

Category	Item	Value
DHT-11	Температура	20.0 °C
	Вологість повітря	45.0 %
Electricity	Напруга	18.6 В
	Струм	0.080 А
	Вати	1.440 W

Графічна залежність основних параметрів сонячної панелі від часу



Графік залежності струму та потужності сонячної панелі у часі



1. Проаналізовано та досліджено інформаційні процеси, що протікають у системах моніторингу сонячних панелей в реальному масштабі часу. Встановлено, що базова структура сонячної електростанції включає в себе чотири основні компоненти: сонячні панелі; контролер заряду; інвертор; акумуляторний блок. Дані компоненти необхідні для безперебійного функціонування сонячної електростанції.

2. Безвідмовна робота сонячних панелей і всіх елементів сонячної електростанції є необхідною умовою для ефективного виробництва електроенергії і прибутковості інвестицій у сонячну електростанцію. Щоб гарантувати тривалу безаварійну роботу, потрібен періодичний аудит (діагностика, рекомендації щодо усунення недоліків) усіх елементів сонячної електростанції.

3. В процесі вдосконалення методу моніторингу сонячних панелей необхідно враховувати властивості сонячних панелей, які відображують їх технічний стан. Крім номінальних показників технічного стану сонячних панелей, а саме вихідного струму сонячної панелі I , вихідної напруги сонячної панелі U та вихідної потужності сонячної панелі P , на якість сонячної панелі впливає зміна цих параметрів сонячної панелі внаслідок зміни освітленості та температури сонячної панелі $I(G, T)$, $U(G, T)$ та $P(G, T)$.

4. Розробка математичних моделей сонячних панелей, які найбільш точно описують вихідний струм, напругу та потужність сонячних панелей, є надзвичайно важливим для зменшення середніх ризиків моніторингу сонячних панелей.

5. В процесі моніторингу сонячних панелей запропоновано використовувати значення струму, напруги та потужності сонячної панелі у трьох точках її вольт-амперної характеристики. Першою точкою для визначення параметрів сонячної панелі є точка на її вольт-амперній характеристиці, яка відповідає режиму короткого замикання сонячної панелі. Виробники сонячних панелей вказують струм короткого замикання, який визначається у стандартних тестових умовах.

6. Розроблено апаратне та програмне забезпечення мікроконтролерної системи керування для вимірювання параметрів, що дозволяють оцінити потужність струму, що продукується сонячною панеллю. Розроблена мікропроцесорна система керування на базі плати ESP8266, яка може працювати в автономному режимі, при цьому значення параметрів виводяться на Web-сервер через мережу Інтернет.

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: 9%

ID: 82463 Назва: Метод моніторингу сонячних панелей Додано в БД: 2020-12-04 Автора: Новак Тетяна Олександрівна Керівники: Мартинюк В.В. Консультанти: Опоненти: Бармак О.В.	Документ		Сумарний збіг по Базі Даних	
	Символи	Лексеми	Символи	Лексеми
	61334	896	1835 (3%)	28 (3%)

Джерело плагіату

ID	Опис	Наявність плагіату в документі	
		Символи	Лексеми



Ім'я користувача:
Kafedra AKITITK

ID перевірки:
1005348109

Дата перевірки:
03.12.2020 14:58:20 EET

Тип перевірки:
Doc vs Internet

Дата звіту:
03.12.2020 15:07:30 EET

ID користувача:
100005862

Назва документа: Novak_magisterska_robota_bez_dodatktiv

Кількість сторінок: 79 Кількість слів: 12884 Кількість символів: 91184 Розмір файлу: 2.49 MB ID файлу: 1005639370

Виявлено модифікації тексту (можуть впливати на відсоток схожості)

11.6%
Схожість

Найбільша схожість: 2.59% з Інтернет-джерелом (<http://socrates.vsau.org/repository/getfile.php/24652.pdf>)

11.6% Джерела з Інтернету

464

Сторінка 81

Пошук збігів з Бібліотекою не проводиться

0% Цитат

Не знайдено жодних цитат

Вилучення списку бібліографічних посилань вимкнено

0%
Вилучень

Немає вилучених джерел

Модифікації

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

Замінені символи

41

Підозріле форматування

14
сторінок

РЕЦЕНЗІЯ
на дипломну роботу магістрантки Новак Тетяни Олександрівни
на тему: “Метод моніторингу сонячних панелей”

Дипломну роботу присвячено розробці методу моніторингу сонячних панелей. В ній на основі математичної моделі сонячної панелі розроблено удосконалений метод моніторингу сонячних панелей, який відрізняється від існуючих методів тим, що запропоновано алгоритм взаємодії мікропроцесорної системи керування засобів моніторингу сонячних панелей з комп'ютером у реальному масштабі часу, який забезпечує підвищення енергетичної ефективності технологічного процесу виробництва електричної енергії.

В процесі моніторингу сонячних панелей запропоновано використовувати значення струму, напруги та потужності сонячної панелі у трьох точках її вольт-амперної характеристики. Крім номінальних показників технічного стану сонячних панелей на якість сонячної панелі впливає зміна цих параметрів сонячної панелі внаслідок зміни освітленості та температури сонячної панелі $I(G,T)$, $U(G,T)$ та $P(G,T)$.

Розроблено апаратне та програмне забезпечення мікроконтролерної системи керування для моніторингу сонячних панелей, що дозволяють оцінити потужність струму, що продукується сонячною панеллю. Розроблена мікропроцесорна система керування на базі плати ESP8266, яка може працювати в автономному режимі, при цьому значення параметрів виводяться на Web-сервер через мережу Інтернет.

Всі розділи магістерської роботи виконанні сумлінно та на високому науковому рівні із дотриманням вимог до дипломних робіт магістрів. Результати досліджень представлені у вигляді статті у фаховому журналі «Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах» №1 2020р.

До недоліків роботи можна віднести неповний аналіз впливу неінформативних параметрів на апаратне та програмне забезпечення мікроконтролерної системи керування для моніторингу сонячних панелей, але вказаний недолік не зменшує наукового рівня магістерської роботи.

Вважаю, що дипломна робота магістрантки Новак Тетяни Олександрівни заслуговує оцінки «відмінно», а магістрантка заслуговує присвоєння кваліфікації магістра з телекомунікацій і радіотехніки.

Опонент:

д.т.н., професор. в. о. завідувача
кафедри комп'ютерних науки та
інформаційних технологій



Бармак О.В.

Завідувачу кафедри
автоматизації, комп'ютерно-
інтегрованих технологій і
телекомунікацій
проф. Мартинюку В.В.
здобувача вищої освіти
Новак Т.О.,
факультету ПКТС, 2 курс,
група ТРМ-19-1

ЗАЯВА

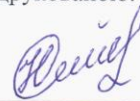
З правилами чинного Положення «Про дотримання академічної доброчесності в Хмельницькому національному університеті» від 26.09.2020 (зі змінами від 26.11.2020), згідно з яким виявлення плагіату є підставою для відмови в допуску кваліфікаційної роботи до захисту та застосування заходів дисциплінарної та академічної відповідальності, ознайомлений (а). Про використання програмно-технічних засобів для перевірки кваліфікаційних робіт здобувачів вищої освіти на плагіат оповіщений (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.

3.12.2020

дата



підпис

РІШЕННЯ КАФЕДРИ

АВТОМАТИЗАЦІЇ, КОМП'ЮТЕРНО-ІНТЕГРОВАНИХ ТЕХНОЛОГІЙ ТА ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЇ

ПРО ДОПУСК КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ ДО ЗАХИСТУ

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

Назва: Метод моніторингу сонячних панелей

Автор: **Новак Тетяна Олександрівна**

Спеціальність: **172 Телекомунікації та радіотехніка**

Освітня програма: Телекомунікації та радіотехніка

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 11,6%, 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.

3.12.2020р.

Науковий керівник роботи:

Мартинюк В.В.

Зав. каф. АКІТіТК

Мартинюк В.В.