

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

Факультет прикладних інформаційних технологій та електроінженерії

(повна назва факультету)

Кафедра електричної інженерії

(повна назва кафедри)

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на здобуття освітнього ступеня

магістр

(назва освітнього ступеня)

на тему: **Розробка системи автоматичного блокування
деградованих сонячних елементів автономних пристроїв**

Виконав студент VI курсу, групи ЕТмз-61
спеціальності 141 Електроенергетика, електротехніка та
електромеханіка

(шифр і назва спеціальності)

(підпис)

Ковальчук В.О.

(прізвище та ініціали)

Керівник

(підпис)

Тарасенко М.Г.

(прізвище та ініціали)

Нормоконтроль

(підпис)

Мовчан Л.Т.

(прізвище та ініціали)

Завідувач кафедри

(підпис)

Тарасенко М.Г.

(прізвище та ініціали)

Рецензент

(підпис)

(прізвище та ініціали)

Тернопіль
2023

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

Факультет Прикладних інформаційних технологій та електроінженерії
(повна назва факультету)
Кафедра Електричної інженерії
(повна назва кафедри)

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри
Тарасенко М.Г.
(підпис) (прізвище та ініціали)
« » 2023 р.

ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

на здобуття освітнього ступеня магістр
(назва освітнього ступеня)
за спеціальністю 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка
(шифр і назва спеціальності)
студенту Ковальчуку Василю Олеговичу
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Розробка системи автоматичного блокування деградованих сонячних елементів автономних пристроїв

Керівник роботи д.т.н., проф. Тарасенко М.Г.
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

Затверджені наказом ректора від «10» листопада 2023 року № 4/7-1039

2. Термін подання студентом завершеної роботи до 25.12.2023

3. Вихідні дані до роботи Низькопотужні автономні пристрої живляться виключно від міні-фотоелектричної системи. Запропонувати більш надійний спосіб блокування деградованих елементів ніж блокуючі і шунтуючі діоди.

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

1. Аналіз ефективності сонячного елемента

2. Способи визначення деградації сонячних елементів

3. Схеми з'єднання сонячних елементів

4. Алгоритм виявлення деградованих сонячних елементів

5. Удосконалений реконфігурований фотоелектричний модуль

6. Моделювання реконфігурованого модуля

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

1. Еквівалентні схеми сонячного елемента

2. Електрогенератор системи живлення автономного пристрою

3. Способи з'єднання масиву сонячних елементів

4. Вольт-амперна характеристика фотоелектричної системи в умовах деградації

5. З'єднання сонячних елементів що використовується для виявлення та усунення деградаційних пошкоджень

6. Архітектура реконфігурованого фотоелектричного модуля

7. Друкована плата ключів

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
<i>Охорона праці</i>	<i>Гурик О.Я. к.т.н., доцент кафедри МТ</i>		
<i>Безпека в надзвичайних ситуаціях</i>	<i>Клепчик В.М., ст. викладач кафедри ХО</i>		

7. Дата видачі завдання _____ 10.11.2023 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	Аналітичний огляд за напрямком кваліфікаційної роботи	з 10.11.2023 по 14.11.2023	
2	Підготовка основної частини пояснювальної записки кваліфікаційної роботи	з 15.11.2023 по 10.12.2023	
3	Підготовка розділу «Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях»	з 11.12.2023 по 13.12.2023	
4	Складання переліку використаних літературних джерел	з 13.12.2023 по 14.12.2023	
5	Підготовка вступу, висновків, змісту, реферату	з 15.12.2023 по 17.12.2023	
6	Підготовка, оформлення та друк графічного матеріалу кваліфікаційної роботи	з 18.12.2023 по 20.12.2023	
7	Отримання відгуку та рецензії на кваліфікаційну роботу, підготовка доповіді на захист	з 21.12.2023 по 25.12.2023	

Студент _____
(підпис)

Ковальчук В.О.
_____ (прізвище та ініціали)

Керівник роботи _____
(підпис)

Тарасенко М.Г.
_____ (прізвище та ініціали)

РЕФЕРАТ

Кваліфікаційна робота магістра містить пояснювальну записку та графічну частину. Пояснювальна записка має 76 сторінок, 17 аркушів презентації, 38 ілюстрацій та 18 використаних першоджерел.

Метою кваліфікаційної роботи є: підвищити надійність фотоелектричних систем, що використовуються для живлення автономних електричних пристроїв у випадках коли виникають тимчасові або постійні втрати в роботі фотоелектричних елементів.

Об'єкт дослідження – процес генерування електроенергії сонячним елементом.

Предмет дослідження – система електроживлення автономних пристроїв.

У роботі розглянуто будову фотоелектричної системи. Наведено спрощену еквівалентну модель фотоелектричного елемента з одним переходом, в якій під час моделювання фотоелектричного елемента враховується питомий опір матеріалу та омичні втрати, зумовлені рівнями контакту. Проведено аналіз процесів деградації в різних технологіях сонячних елементів обговорювалася і перераховані фактори, що впливають на деградацію сонячного елемента, описаний процес деградації, а також способи прогнозування, моніторингу та запобігання деградації технології сонячних елементів. Розроблено модуль моніторингу струму короткого замикання для кожного фотоелектричного елемента. Розроблено систему ре конфігурування масиву сонячних елементів, з можливістю виключення деградованих сонячних елементів з фотоелектричного масиву.

Ключові слова: **СОНЯЧНА ЕНЕРГЕТИКА, ВІТРОВА ЕНЕРГЕТИКА, ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ**

ЗМІСТ

ВСТУП

1 АНАЛІТИЧНИЙ РОЗДІЛ	9
1.1 Фотоелектричний ефект у сонячних елементах	9
1.2 Сонячні елементи та їх покоління	10
1.2.1 Перше покоління сонячних елементів	10
1.2.2 Друге покоління сонячних елементів	10
1.2.3 Третє покоління сонячних елементів	11
1.2.4 Четверте покоління сонячних елементів	13
1.3 Аналіз ефективності сонячного елемента	13
1.3.1 Сонячний спектр та освітленість	13
1.3.2 Ефективність перетворення енергії	14
1.4 Висновки до розділу	20
2 ПРОЕКТНО-КОНСТРУКТОРСЬКИЙ РОЗДІЛ	
2.1 Способи визначення деградації сонячних елементів	21
2.2 Реконфігурований сонячний фотоелектричний масив	22
2.3 Схема з'єднання з повним перехресним зв'язком	34
2.4 Схема з'єднань з мостовими зв'язками	34
2.5 Схема з'єднання гібридної конфігурації	36
2.6 Висновки до розділу	37
3 РОЗРАХУНКОВО-ДОСЛІДНИЦЬКИЙ РОЗДІЛ	
3.1 Несправності, що виникають у фотоелектричних системах	38
3.2 Деградація фотоелектричної системи	40
3.2.1 Види деградації	40
3.2.2 Забруднення передньої поверхні	40
3.2.3 Оптична деградація	42
3.2.4 Деградація сонячних елементів	42

3.2.5 Пошкоджені (деградовані) сонячні елементи	43
3.2.6 Світло-індукована деградація	44
3.2.7 Деградація, спричинена температурою	45
3.3 Аналіз деградації у фотоелектричній системі.....	45
3.4 Виявлення деградованих сонячних елементів у фотоелектричній системі	46
3.4.1 Виявлення деградованого сонячного елемента за допомогою струму короткого замикання	46
3.4.2 Алгоритм виявлення деградованих сонячних елементів	49
3.5 Удосконалений реконфігурований фотоелектричний модуль.....	60
3.5.1 Моделювання та імітація реконфігурованого модуля	60
3.5.2 Проектування друкованої плати ключів (транзисторів) реконфігурованого модуля	64
3.5.3 Блок-схема системи керування.....	66
3.6 Висновки до розділу	67
4 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ.....	68
4.1 Основні вимоги безпеки до улаштування та експлуатації технологічного обладнання	68
4.2 Сигнально-попереджувальні пристрої і фарбування обладнання	70
4.3 Особливості проведення рятувальних та інших невідкладних робіт при ліквідації наслідків великих виробничих аварій і катастроф.....	71
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ	74
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ	75

ВСТУП

Актуальність теми.

Автономні електричні пристрої (наносупутники), потребують електричної енергії для своєї роботи. Необхідна їм електрична енергія надходить від сонячного випромінювання. Таким чином, фотоелектричні модулі використовуються для генерації, зберігання і розподілу цієї енергії. Найчастіше вони використовують сонячну енергію як первинну енергію для негайної генерації електричної енергії. Вони оснащені системою сонячних генераторів з фотоелектричних елементів, які безпосередньо перетворюють енергію сонячного випромінювання в електричну енергію. Разом з фотоелектричними батареями автономні електричні пристрої мають акумуляторні батареї для зберігання виробленої електричної енергії, яка, у свою чергу, буде використовуватися для живлення, коли фотоелектричні батареї не зможуть виробляти достатню або необхідну для роботи потужність.

Автономні пристрої на кшталт наносупутників чи інші космічні апарати, використовують фотоелектричні модулі для безперебійного електроживлення, яке життєво важливе для їх функціонування. Через певні обмеження щодо розмірів і маси таких пристроїв надмірність компонентів, наприклад, фотоелектричних модулів, не буде корисною. Загалом, фотоелектричні модулі використовуються на більшості космічних апаратів тривалої місії для виробництва електроенергії. Розрахунковий термін експлуатації, як правило, обмежений приблизно п'ятнадцятьма роками через деградацію. Деградація, що призводить до виходу з ладу фотоелектричних модулів, залежить від багатьох факторів, деякі з яких взаємодіють між собою, викликаючи деградацію, яку важко змоделювати в наземній лабораторії під час проектування і випробувань фотоелектричної системи живлення. Постійна деградація фотоелектричних модулів може бути класифікована як:

1. Деградація конструкційних матеріалів, наприклад, пошкодження скляної кришки;

2. Проблеми розшарування, тобто втрата адгезії шарів, що призводить до перегріву модуля;
3. Деградація комірки або модуля в результаті температурного циклу;
4. Деградація, спричинена впливом вологи;
5. Деградація напівпровідникового пристрою.

За останні сорок років було проведено багато досліджень щодо деградації фотоелектричних модулів. На основі майже двох тисяч показників деградації було запропоновано середній річний темп деградації в 0,5.

Слід зазначити, що сонячні елементи, які використовують для живлення автономних пристроїв у космосі повинні працювати в суворих умовах навколишнього середовища, оскільки високоенергетичні протони і електрони пошкоджують напівпровідниковий матеріал, що призводить до безперервної деградації ефективності сонячних елементів. Тому інженерам потрібен надійний метод прогнозування очікуваної деградації фотоелементів в умовах активного опромінювання. Різні види фотоелектричних комірок по-різному реагують на опромінення залежно від використовуваних матеріалів, товщини активних областей, а також типів і концентрацій домішок.

Беручи до уваги ці фактори, безсумнівно є актуальним підвищення надійності фотоелектричних систем, що використовуються для живлення автономних електричних пристроїв.

Мета і завдання дослідження. Метою даної роботи є: підвищити надійність фотоелектричних систем, що використовуються для живлення автономних електричних пристроїв у випадках коли виникають тимчасові або постійні втрати в роботі фотоелектричних елементів.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

1. Провести аналіз ефективності перетворення випромінювання сонячним елементом у електричний струм.
2. Провести аналіз методів визначення деградованих сонячних елементів.
3. Запропонувати схеми з'єднання сонячних елементів без діодів.

4. Розробити модуль моніторингу струму короткого замикання для кожного сонячного елемента.
5. Розробити схему реконфігурованого масиву сонячних елементів для ізоляції деградованих елементів.

Об'єкт дослідження – процес генерування електроенергії сонячним елементом.

Предмет дослідження – система електроживлення автономних пристроїв.

Наукова новизна отриманих результатів.

Дістав подальший розвиток алгоритм зміни підключення сонячних елементів у модулі при виявленні процесів деградації.

Практичне значення отриманих результатів.

Виявлення та ізоляція деградованих сонячних елементів є дуже важливим для автономних пристроїв, які живляться від сонячної фотоелектричної системи, а особливо, коли до них не має доступу. Особливо це є актуальним для наносупутників, в яких єдиним джерелом живлення є фотоелектрична система.

Апробація. Результати досліджень за темою кваліфікаційної роботи були представлені на X Міжнародній науково-технічній конференції молодих учених та студентів «Актуальні задачі сучасних технологій», 25-26 листопада 2023 року. ТНТУ [1]

Структура роботи. Робота складається зі вступу, 4 розділів, висновків, переліку посилань (18 найменувань).

Загальний обсяг текстової частини – 76 сторінок, 38 рисунків.

1 АНАЛІТИЧНИЙ РОЗДІЛ

1.1 Фотоелектричний ефект у сонячних елементах

Генерація напруги або електричного струму в матеріалі або пристрої при освітленні світлом відома як фотоелектричний ефект. Вперше фотоелектричний ефект спостерігав у 1839 році французький фізик Едмунд Беккерель, коли виявив, що освітлення світлом електрода, зануреного в електропровідний розчин, створює електричний струм. Пізніше, у 1873 році, В. Сміт відкрив фотопровідність у селені, і це дало початок фотоелектричній технології. Пристрої, які демонструють фотоелектричний ефект, відомі як фотоелектричні пристрої або сонячні батареї.

Насправді, фотоелектричний ефект з'являється в напівпровідникових пристроях, де під впливом світла фотони поглинаються в напівпровідниковому матеріалі, що збуджує електрони з валентної зони в зону провідності. Такі електрони в зоні провідності називаються валентними електронами, і вони залишають за собою відповідні дірки у валентній зоні. Ці електрони і дірки потрібно витягнути назовні, щоб отримати електрику. Через протилежні заряди електронів (негативно заряджені) і дірок (позитивно заряджені), вони мають тенденцію до рекомбінації, якій слід запобігати. Сонячні елементи спроектовані і підготовлені таким чином, що згенеровані фотоелектром електрони і дірки рухаються в протилежних напрямках за допомогою процесів дрейфу і дифузії і збираються там. Сонячний елемент складається з двох електродів, між якими знаходиться світлопоглинаюче середовище [2]. Накопичення фотогенерованих носіїв заряду на електродах в протилежних сторонах напівпровідника викликає електрорушійну силу; на приладі розвивається фотонапруга. Якщо до пристрою підключити електричне коло, через нього буде проходити електричний струм, і таким чином світлова енергія перетворюється в електричну. Дрейф забезпечується вбудованим електричним полем, тоді як дифузія викликана градієнтом концентрації фотогенерованих носіїв заряду. Якщо енергія

падаючих фотонів менша за ширину забороненої зони напівпровідника, фотони не поглинаються і фотоелектричний ефект не спостерігається [3].

1.2 Сонячні елементи та їх покоління

1.2.1 Перше покоління сонячних елементів

Фотоелектричні елементи були створені більше ста років тому. Перший твердотільний сонячний елемент був виготовлений Чарльзом Фрітсом у 1883 році, коли він наніс тонку плівку золота на напівпровідник селену для формування переходу і отримав близько 1% ефективності перетворення енергії. Через невдалі експерименти з селеновими сонячними елементами було проведено більше експериментів з іншими матеріалами, що призвело до появи наступних поколінь сонячних елементів [4].

Монокристалічні кремнієві сонячні елементи, полікристалічні кремнієві сонячні елементи, аморфні кремнієві сонячні елементи та гібридні кремнієві сонячні елементи були першим поколінням сонячних елементів. Ці сонячні елементи також відомі як звичайні, традиційні сонячні елементи, виготовлені з кремнію ("3 покоління сонячних елементів", n.d.). Зокрема, монокристалічні кремнієві сонячні елементи, полікристалічні кремнієві сонячні елементи, мали досить високу продуктивність, що робило їх надійним джерелом генерації електроенергії для супутників і космічних апаратів з дуже високою експлуатаційною вартістю порівняно з їхньою потужністю. Через високу вартість і складний процес виготовлення цих сонячних елементів виникла потреба у створенні наступних поколінь [4].

1.2.2 Друге покоління сонячних елементів

Для економічно ефективної технології сонячних елементів були розроблені нові процеси і матеріали, які включали сонячні елементи з аморфного кремнію (a-Si), сонячні елементи з диселеніду міді, індію та галію

(CIGS) і сонячні елементи з телуриду кадмію (CdTe) [4]. Ці матеріали обробляються у вигляді тонких плівок, і сонячні елементи, виготовлені з них, також відомі як тонкоплівкові сонячні елементи, оскільки порівняно з першим поколінням кремнієвих сонячних елементів вони виготовляються з шарів напівпровідникових матеріалів товщиною лише кілька мікрметрів ("3 покоління сонячних елементів"). Ці сонячні елементи містять невелику кількість активних матеріалів і розробляються на недорогих підкладках, таких як скло і пластик; їх можна легко експлуатувати на великих площах, а при обробці пластикових підкладок їх можна легко виготовляти з рулону в рулон [4]. Порівнюючи сонячні елементи другого покоління з сонячними елементами першого покоління з точки зору ефективності та вартості, можна зробити висновок, що сонячні елементи другого покоління менш ефективні, ніж сонячні елементи з кристалічного кремнію.

1.2.3 Третє покоління сонячних елементів

Третє покоління сонячних елементів включає в себе багатоперехідні сонячні елементи і нові фотоелектричні технології, такі як:

- Сенсibilізовані барвниками сонячні елементи (DSSC): це ще один клас тонкоплівкових сонячних елементів, який базується на органічних барвниках. Вони досить тонкі, легкі і можуть оброблятися при низьких температурах на недорогих підкладках, таких як скло, пластик і металева фольга. Низька вартість обробки і недорогі матеріали роблять ці елементи дуже економічно ефективними [4];

- Органічні сонячні елементи (ОСЕ): це твердотільні тонкоплівкові сонячні елементи на основі органічних напівпровідників. Органічні напівпровідники - це особливий клас ароматичних вуглеводнів, в яких атоми вуглецю гібридизовані sp^2 і мають почергові одинарні та подвійні зв'язки. Через зміну одинарних і подвійних зв'язків між атомами вуглецю ці матеріали також відомі як спряжені напівпровідники. Загалом, це ізолятори в чистому вигляді;

вони називаються напівпровідниками, оскільки їхня електропровідність зростає експоненціально з температурою, а деякі інші властивості, такі як ширина забороненої зони, подібні до властивостей їхніх неорганічних напівпровідників. За провідність у цих матеріалах відповідає зміна одинарних і подвійних зв'язків [4];

- Квантові точкові сонячні елементи (QDSC): ще одна технологія сонячних елементів, що базується на концепції мінімізації втрат енергії з використанням напівпровідників з різною шириною забороненої зони, подібно до плоских багатоперехідних елементів, але з кращою стійкістю в сонячному спектрі і простотою у виробництві [4];

- Багатоперехідні сонячні елементи: на основі напівпровідників III-V групи, таких як арсенід галію (GaAs), антимонід галію (GaSb) та фосфід індію (InP), також мають відмінні оптичні та електричні властивості, що робить їх потенційними кандидатами для застосування в сонячних елементах. Вони мали дуже високі коефіцієнти оптичного поглинання і поглинали більшу частину падаючого світла в межах декількох мікрометрів. У 1980-х роках сонячні елементи на основі GaAs перевершили кремнієві за ефективністю, а в 1990-х роках витіснили їх у супутниковому застосуванні. Монокристалічні одноперехідні тонкоплівкові сонячні елементи на основі GaAs мають рекордну максимальну ефективність 28,8%, яка залишається незмінною з початку 1990-х років. Крім того, були проведені експерименти з підвищення ефективності сонячних елементів. Це відкрило шлях до розробки сонячного елемента з потрійним переходом GaInP/GaAs/Ge, де перехід GaInP₂/GaAs був вирощений на підкладці Ge, і пристрій продемонстрував ефективність 34,1%. У 2012 році Агі та ін. досягли ефективності 36,9% у сонячному елементі з потрійним переходом GaInP/GaAs/GaInAs. Сонячні елементи з потрійним переходом утримують поточну максимальну ефективність 37,9% без будь-якого концентратора. Багатоперехідні сонячні елементи є єдиними сонячними елементами третього покоління які є комерційно доступними. Вони є високоефективними і б'ють світові рекорди з продуктивності, але ці сонячні

елементи дуже дорогі і використовуються лише на супутниках та інших наземних пристроях [4].

1.2.4 Четверте покоління сонячних елементів

Четверте покоління сонячних елементів є досить футуристичним і, як очікується, матиме дуже високу ефективність перетворення енергії. Вони можуть бути виготовлені на великій площі з великою легкістю, як сонячні елементи, сенсibilізовані барвниками, та органічні сонячні елементи. Крім того, висока ефективність перетворення енергії зробить їх потенційними кандидатами для майбутньої генерації електроенергії. Сонячні елементи четвертого покоління включають органічно-неорганічні гібридні та металоорганічні галогенідні перовскітні сонячні елементи.

1.3 Аналіз ефективності сонячного елемента

1.3.1 Сонячний спектр та освітленість

Сонце є багатим джерелом енергії, яка походить від реакції ядерного синтезу через низку протон-протонних ланцюжків, де водень перетворюється на гелій. Температура зовнішньої поверхні Сонця становить близько 5778° К.

Інтенсивність сонячного випромінювання на середній відстані від Землі становить близько 1361 Вт/м² і відома як сонячна стала [4]. Сонячне випромінювання за межами земної атмосфери називається нульовою масою повітря (AM0), що означає відсутність атмосфери і відсутність відхилення від початкового сонячного спектру. Цей спектр можна прирівняти до спектру чорного тіла при температурі 5800° К. Цей спектр важливий для аналізу продуктивності сонячних батарей супутників і космічних апаратів.

1.3.2 Ефективність перетворення енергії

Відсоток сонячної енергії, що падає на поверхню сонячного елемента і перетворюється на корисну електроенергію, вважається ефективністю перетворення енергії конкретного сонячного елемента. Загалом, перетворення фотоелектричної енергії в сонячних елементах відбувається у два основних етапи:

- По-перше, поглинання світла генерує електронно-діркову пару. Потім електрон і дірка розділяються структурою пристрою. Електрони потрапляють до негативної клеми, а дірки - до позитивної, таким чином відбувається генерація електричної енергії [5].

Якщо до двох електродів або до двох клем підключено навантаження, можна помітити потік електричного струму, що проходить через підключене навантаження. У випадках, коли до клем сонячного елемента не підключено навантаження або сонячний елемент знаходиться в розімкнутому стані, різниця потенціалів, що встановлюється між двома клемами сонячного елемента при освітленні, називається напругою розімкнутого контуру (V_{pk}). У цьому випадку струм від сонячного елемента не буде надходити.

Розглядаючи сценарій, в якому обидві клеми освітленого сонячного елемента замкнуті накоротко, потік електричного струму буде проходити через короткозамкнений перехід, і це буде максимально можливий струм, який може бути отриманий від освітленого сонячного елемента при конкретній заданій інтенсивності світла. Значення цього виміряного струму в умовах короткого замикання називається струмом короткого замикання ($I_{кз}$). Підкреслюється, що під час короткого замикання напруга на клемі освітленого сонячного елемента буде дорівнювати нулю вольт. Порівнюючи параметри стану навантаження з параметрами обриву, струм і напруга на навантаженні будуть меншими, ніж $I_{кз}$ і V_{pk} .

Для визначення ефективності перетворення енергії конкретного сонячного елемента важливу роль відіграє знання максимальної електричної

потужності, що віддається на навантаженні, підключеному до клем сонячного елемента, тому надалі вимірюється вольт-амперна характеристика, представлена вольт-амперною характеристикою (I-V) сонячного елемента, коли сонячний елемент підсвічений [6].

Вимірювання зазначених I-V характеристик [7] може бути досягнуто за допомогою наступного кроку:

- Використання джерела вимірювання в якості змінного навантаження, до якого подається напруга в діапазоні від'ємних до додатних значень і вимірюється та реєструється відповідний струм через комірку.

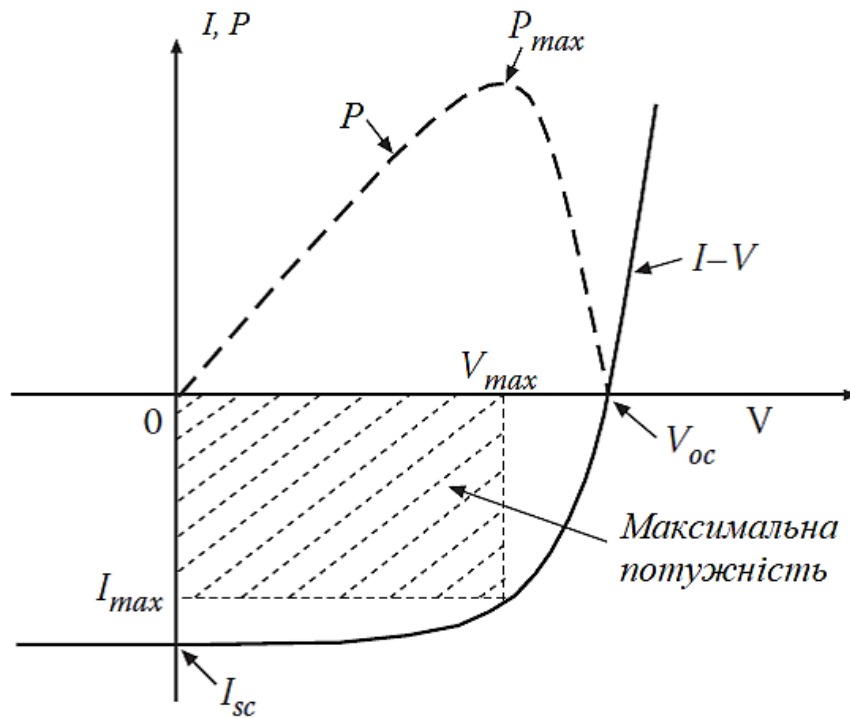


Рисунок 2.1 - I-V характеристики сонячного елемента при освітленні (суцільна крива). Пунктирна крива представляє відповідний перевернутий графік потужності

Точка, що відповідає максимальному значенню на графіку потужності, являє собою максимальну електричну потужність, отриману від сонячного елемента, відомому як:

$$P_{\max} = I_{\max} \cdot V_{\max} \quad (1.1)$$

Таким чином, ефективність перетворення потужності (η) освітленого сонячного елемента може бути розрахована за допомогою рівняння (1.2).

$$\eta = \frac{P_{\max}}{P_{in}} = \frac{I_{\max} \cdot V_{\max}}{P_{in}}, \quad (1.2)$$

де: P_{in} : значення падаючої оптичної потужності, Вт.

Коефіцієнт заповнення в основному визначається як відношення P_{\max} до ($I_{кз}$ помножити на $V_{рк}$), він може бути виражений як (1.3):

$$FF = \frac{I_{\max} \cdot V_{\max}}{I_{кз} \cdot V_{рк}} \quad (1.3)$$

Практично, коефіцієнт заповнення є мірою якості сонячного елемента і визначає форму характеристик. Математична підстановка рівнянь (1.2) і (1.3) в першу формулу ефективності перетворення енергії сонячного елемента утворить рівняння (1.4).

$$\eta = \frac{I_{кз} \cdot V_{рк} \cdot FF}{P_{in}} \quad (1.4)$$

Використовуючи позначення у відсотках, ефективність перетворення енергії сонячного елемента у відсотках можна визначити за допомогою наведеного нижче рівняння:

$$\eta = \frac{I_{кз} \cdot V_{рк} \cdot FF}{P_{in}} \cdot 100. \quad (1.5)$$

Необов'язковість того, щоб закони фізики поводитися однаково для всіх компонентів, ґрунтується на тому простому факті, що сонячні елементи

виготовляються на основі різних архітектур пристроїв. Таким чином, ми отримуємо різні типи генерації сонячних елементів. Тому кожен тип сонячного елемента необхідно досліджувати окремо з урахуванням типу сонячного елемента. Важливо розуміти, що сонячний елемент з р-п-переходом насправді є діодом з р-п-переходом, і подача напруги спричиняє протікання струму через перехід, навіть коли елемент не освітлений [4]. Таким чином, темновий струм (I_D) буде назвою вимірюваного струму в цьому випадку. Під час вимірювання струму-напруги при освітленні разом з фотогенерованим струмом циркулює і темновий струм. Цей параметр завжди слід враховувати, дивлячись на фактичне значення фотогенерованого струму.

Розглядаючи ідеальний діод з р-п переходом, значення темного струму розраховується за наведеним нижче рівнянням:

$$I_D = I_s \exp^{qV / K_B T} - 1, \quad (1.6)$$

де I_s - зворотний струм насичення діода ;

q - елементарний заряд ;

K_B - постійна Больцмана;

T - абсолютна температура діода.

Від'ємний фотострум виникає завдяки потоку фотогенерованих електронів і дірок, які складають фотострум. Фотогенеровані електрони і дірки повинні рухатися до катода і анода, що призводить до потоку фотоструму від N-типу до P-типу через перехід. Ідеальний р-п перехід не має рекомбінаційних втрат і струм короткого замикання дорівнює значенню фотоструму I_L . При зворотному зміщенні як темновий струм, так і фотострум будуть від'ємними, в той час як при прямому зміщенні темновий струм буде додатним, а фотострум від'ємним. Отже, загальний струм буде зменшуватися до тих пір, поки не стане нульовим при значенні напруги холостого ходу, при якому темновий струм і фотострум мають однакову амплітуду. Значення загального струму (I_{3ae}), що

циркулює в сонячному елементі при освітленні, можна виразити рівнянням, наведеним нижче.

$$I_{\text{заг}} = I_S \exp^{qV / K_B T} - 1 - I_L. \quad (1.7)$$

У випадку короткого замикання (коли ми маємо: $V=0$), вираз загального струму через елемент буде мати наступні члени:

$$I_{\text{заг}} = I_{\text{кз}} = -I_L. \quad (1.8)$$

У випадку обриву ланцюга (коли маємо: $I_{\text{заг}} = 0$), напруга на сонячному елементі, відома як $V_{\text{рк}}$, буде розраховуватися за формулою:

$$V_{\text{рк}} = \frac{K_B T}{q} \cdot \ln \left(\frac{I_L}{I_S} + 1 \right) \approx \frac{K_B T}{q} \cdot \ln \left(\frac{I_L}{I_S} \right) \quad (1.9)$$

На практиці виведенню заряду з сонячного елемента перешкоджають деякі параметри, що призводить до рекомбінації носіїв заряду. Певний питомий опір, безсумнівно, є у всіх напівпровідниках, який стримує виведення зарядів. Крім того, дефекти в плівці та енергетичні бар'єри на контактах перешкоджають вилученню заряду. Всі компоненти, відповідальні за переривання екстракції зарядів, характеризуються опором, послідовно з'єднаним (R_s) з діодом. Тоді як рекомбінація носіїв заряду характеризується: шунтуванням діода опором, підключеним паралельно (R_p). Як і будь-який електричний пристрій або компонент, сонячний елемент можна змоделювати за допомогою еквівалентної схеми, показаної на рис. 1.2 [8]:

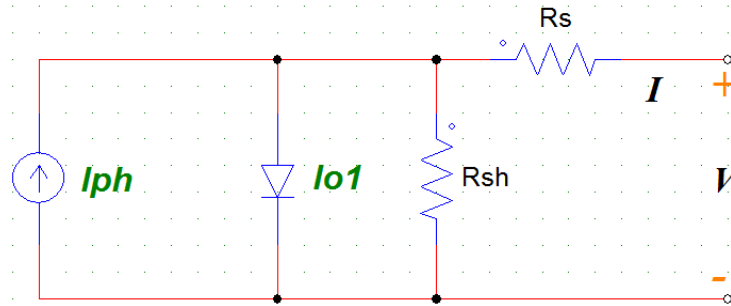


Рисунок 1.2 - Еквівалентна схема освітлення сонячного елемента з р-п переходом (модель з одним діодом)

Таким чином, загальний струм може бути виражений рівнянням нижче:

$$I_{заг} = I_S \exp^{qV - IR_s / nK_B T} - 1 + \left(\frac{V - IR_s}{R_p} \right) - I_L, \quad (1.10)$$

де n - коефіцієнт ідеальності діода.

Аналогічно, математичну модель сонячного елемента можна скласти, додавши параметри, які здатні впливати на поведінку сонячного елемента. Нижче перераховані параметри, які можуть впливати на поведінку конкретного сонячного елемента:

- Інтенсивність падаючого світла;
- Робоча абсолютна температура;
- Деградація під дією космічного випромінювання.

Враховуючи всі ці фактори, нову еквівалентну схему сонячного елемента можна зобразити на рис. 1.3.

Нова модель розглядається як альтернативна модель сонячного елемента, яка називається дводіодною моделлю сонячного елемента. Вихідний струм (I) моделі з двома діодами знайдемо за допомогою виразу, наведеного нижче:

$$I = I_L - I_d \exp^{qV - IR_s / K_B T} - 1 - I_r \exp^{qV - IR_s / 2K_B T} - 1 - \left(\frac{V - IR_s}{R_p} \right), \quad (1.11)$$

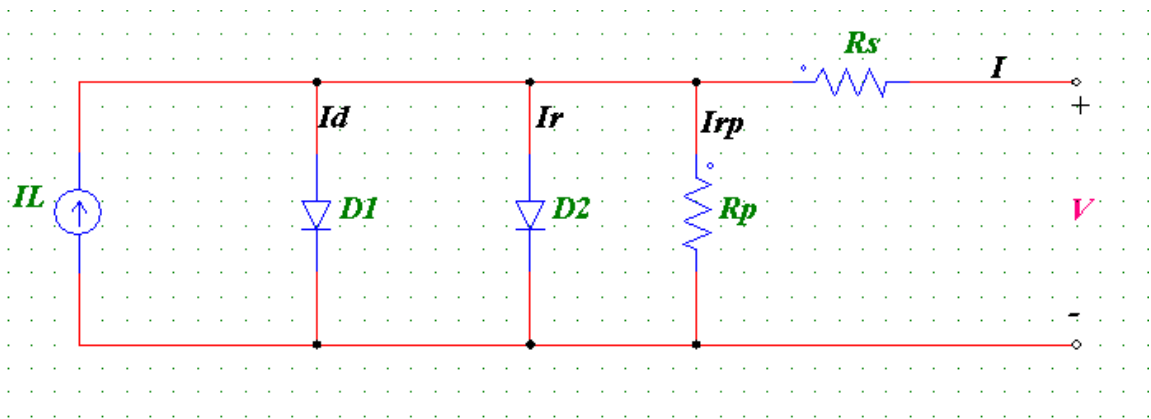


Рисунок 1.3 - Еквівалентна схема освітлення сонячного елемента з р-п переходом за допомогою двох діодів

1.4 Висновки до розділу

1. Теоретично досліджено природу виникнення електричного потенціалу при освітленні сонячного елемента. Обґрунтовано природу процесів, які в ньому протікають.
2. Проведено аналіз різних типів сонячних елементів, їх ефективності та перспективи підвищення ККД.
3. Проведено аналіз ефективності перетворення випромінювання сонячним елементом у електричний струм. Описано математичну модель, яка відображає поведінку сонячного елемента при попаданні на нього випромінювання. В подальшому її буде використано для моделювання.

2 ПРОЕКТНО-КОНСТРУКТОРСЬКИЙ РОЗДІЛ

2.1 Способи визначення деградації сонячних елементів

Для визначення деградації сонячних елементів можна використовувати підхід, заснований на дозі пошкодження зі зміщенням. Іншим ключовим моментом будуть інші різні методи, які можуть бути використані для виконання розрахунків деградації космічних сонячних елементів, такі як [9]:

- метод еквівалентної флюенсації (Jet Propulsion Laboratory): в якому коефіцієнти пошкодження повинні бути визначені за допомогою великого набору експериментальних вимірювань.

- Метод дози пошкодження при зміщенні (Naval Research Laboratory), відомий як Dd-метод: за допомогою якого енергетична залежність коефіцієнтів пошкодження визначається на основі розрахунку неіонізуючих втрат енергії, що називається NIEL.

- Метод реалізації SPENVIS.

Важливо розуміти, що перераховані вище підходи допомагають лише в прогнозуванні деградації сонячних елементів в умовах космічного випромінювання з використанням єдиної характерної кривої деградації конкретного сонячного елемента. Крім того, кінець терміну експлуатації сонячного елемента для даної місії може бути визначений через зчитування його характеристичної кривої після того, як буде задана доза пошкодження. Інформація, отримана з характеристичної кривої, допоможе під час підготовки місії на рівні першого етапу.

Насправді після прогнозування параметрів деградації сонячних елементів не виконується жодних дій щодо деградованих сонячних елементів, встановлених на супутниках, які фактично перебувають на орбіті в космічному середовищі.

2.2 Реконфігурований сонячний фотоелектричний масив

Космічне середовище Землі і сонячна активність можуть мати згубний вплив на сонячні технології, які використовуються сучасною спільнотою космічної інженерії. Таким чином, правильне розуміння природи цих впливів має вирішальне значення для успішного і ефективного проектування, впровадження та експлуатації нових космічних технологій. Важливо підкреслити, що для захисту вразливих систем від шкідливого впливу космічного середовища на даному етапі для реалізації запланованої схеми захисту цінним є краще нове розуміння будови використовуваного технологічного обладнання, його роботи, процесу його зносу і доступ до його ключових даних. Витримати радіаційне середовище, з яким можуть зіткнутися всі космічні апарати, що відправляються на орбіту навколо Землі або в далекі райони Сонячної системи, буде головною метою розроблюваних космічних технологій. Тим не менш, аномалії, спричинені космічним випромінюванням, впливають на роботу комп'ютерної пам'яті та процесорів на борту цих космічних апаратів, і такі аномалії стають все більш поширеними, оскільки напівпровідникові пристрої продовжують зменшуватися в розмірах. У зв'язку із загрозою космічного середовища для систем космічних апаратів, а з іншого боку, безпекою космічного середовища для здоров'я, коли йдеться про зменшення космічного сміття, в космічній галузі спостерігається зростання попиту на більш надійні та ефективні джерела енергії, що не потребують технічного обслуговування. Дивовижним результатом спільного проекту між національними лабораторіями відновлюваної енергетики Міністерства енергетики США та дослідниками з двох швейцарських центрів стала випробувана лінійка багатоперехідних сонячних елементів з ефективністю до 35,9 відсотка. Дивно, але цей новий сонячний елемент з ефективністю вище тридцяти п'яти відсотків є новим високим рекордом багатоперехідних космічних сонячних елементів. Маючи на увазі, що на генерацію енергії сонячних елементів сильно впливає суворя радіаційна обстановка в космічному

середовищі, були проведені інтенсивні дослідження технологій фотоелектричної генерації електроенергії. Практично, універсальна конструкція фотоелектричної системи генерації складається з наборів сонячних елементів.

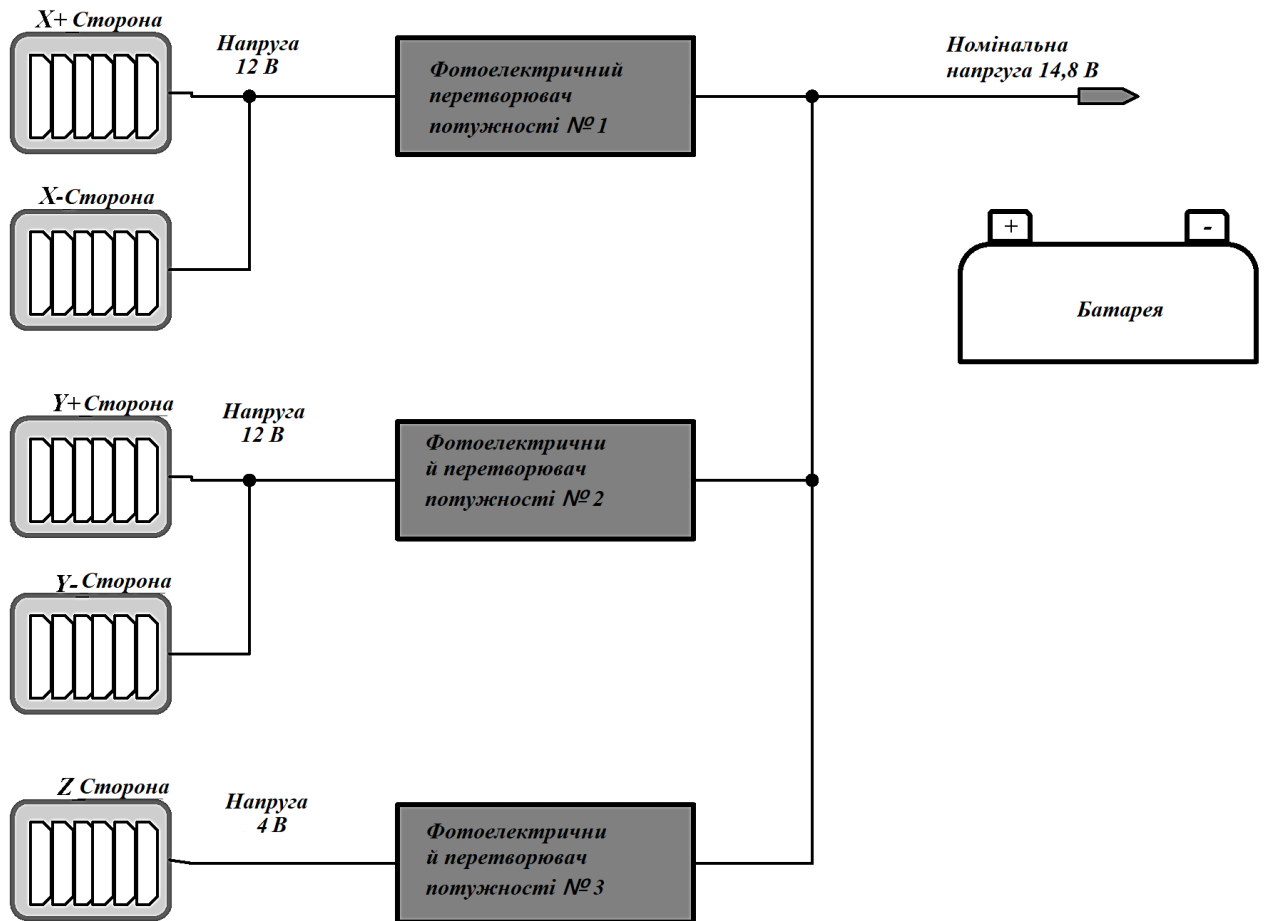


Рисунок 2.1 - Генератор системи живлення наносупутника (автономного пристрою) розміром 3U з фотоелектричними батареями

Крім того, ці сонячні елементи можуть бути згруповані в набори масивів, в яких кожен масив може бути побудований з певної кількості паралельних фотоелектричних ланцюжків (послідовно-паралельна схема, відома як "SP"), або з певної кількості послідовно з'єднаних ярусів (повна перехресна схема, відома як "TSP").

Однак практика використання фотоелектричних генераторів на космічних апаратах має певні обмеження, спричинені низькою ефективністю сонячних елементів на метр квадратний, чергуванням дня і ночі, що призводить до

перебоїв у роботі сонячного джерела світла, відключенням сонячних елементів через електричні невідповідності. Але важливо розуміти, що у випадку, якщо спостерігаються відмінності в електричних характеристиках сонячних елементів, що утворюють один фотоелектричний модуль, і фотоелектричних модулів, що утворюють фотоелектричний ланцюжок, можна спостерігати стійке зниження виробленої вихідної потужності генераторів всієї фотоелектричної системи. За цих обставин буде спостерігатися розрив між можливим виробництвом енергії та поточною енергією, що видобувається. Сьогодні зусилля дослідників та науковців сприяють підвищенню ефективності перетворення фотоелектричних модулів та сонячних елементів за допомогою нових реалізацій та ефективних алгоритмів для блоку перетворення енергії та алгоритмів відстеження точки максимальної потужності, відомих як алгоритми МРРТ. З іншого боку, дослідники підштовхнули свій спосіб мислення до того, щоб фактично поховати обмеження, які можуть мати алгоритм МРРТ і алгоритм перетворення потужності плюс ефективний алгоритм; ці дослідження призвели до розробки стратегій відстеження сонячної енергії та ефективного алгоритму виявлення несправностей на генераторі фотоелектричної системи.

Безсумнівно, фактичний інструмент може бути використаний для обчислення ймовірності стану надійності даного масиву сонячних елементів після заданої тривалості його експлуатації. Це так званий інструмент аналізу надійності сонячної батареї. При цьому розрахована надійність, позначена " R ", масиву сонячних елементів дорівнює розрахованій ймовірності успіху, відомій як " P_s " [10]:

$$P_s = R = e^{-\lambda t}, \quad (2.1)$$

де λ - інтенсивність відмов масиву сонячних елементів

t - час роботи або кількість температурних циклів, відповідно.

Таким чином, ймовірність відмови, відома як " P_s ", визначається як:

$$P_f = 1 - P_s \quad (2.2)$$

На практиці, несправний сонячний елемент може досягти критично високої температури, що означає, що може виникнути явище "гарячої точки" і, як наслідок, електрична несправність фотоелектричного модуля. Тому, щоб уникнути виникнення гарячих точок і неузгодженості, використовуються послідовні діоди і шунтуючі діоди (рис. 2.2, 2.3).

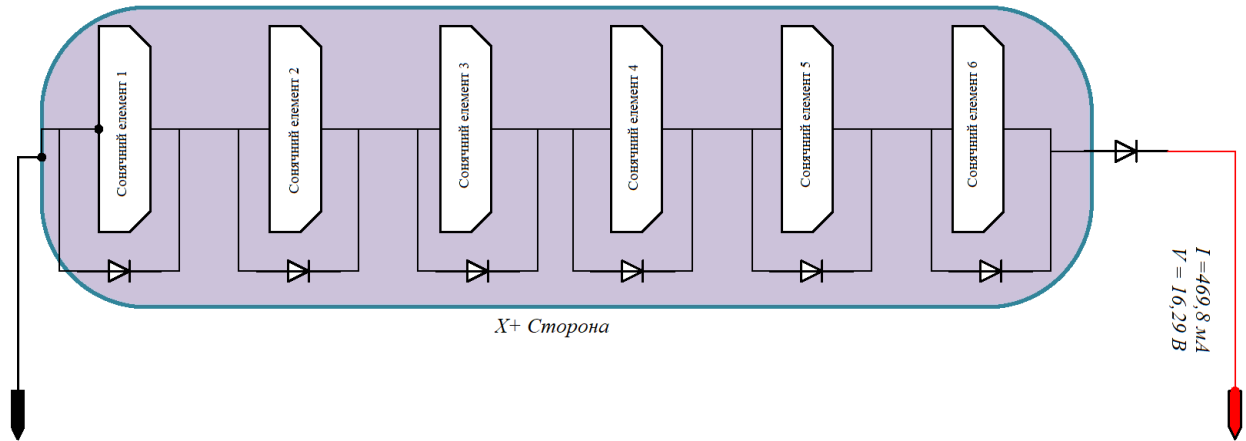


Рисунок 2.2 - З'єднання масиву сонячних елементів зі вставленими шунтувальними і послідовними діодами

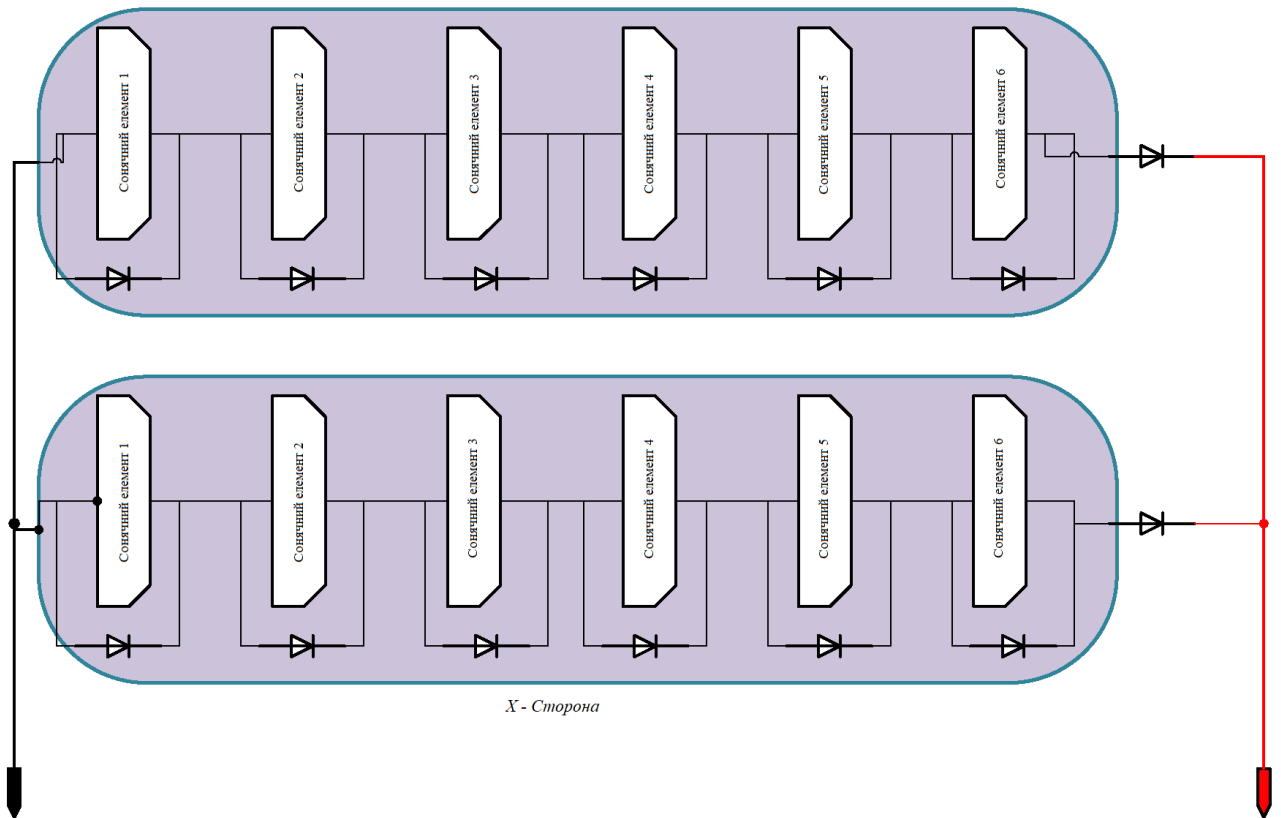


Рисунок 2.3 - З'єднання двох паралельних граней фотоелектричної системи

Насправді, вставлені діоди в масив фотоелектричних сонячних елементів матимуть падіння напруги на кожному з цих розроблених діодів. Таким чином, вони будуть вносити втрати і локальні максимуми в електричні характеристики фотоелектричного модуля. Як наслідок, вироблена електрична енергія зменшиться і знизиться ефективність перетворення сонячних елементів.

Звернемо увагу на те, що у фотоелектричній системі автономного пристрою (наносупутника) сонячні батареї можуть бути з'єднані в різних конфігураціях. Зазвичай, стаціонарна система сонячних батарей автономного пристрою, як показано на рисунку вище, виконана шляхом послідовного і паралельного з'єднання модулів сонячних батарей. Отримані послідовні, паралельні та послідовно-паралельні з'єднання складають елементну конфігураційну схему генератора фотоелектричної системи джерела живлення автономного пристрою.

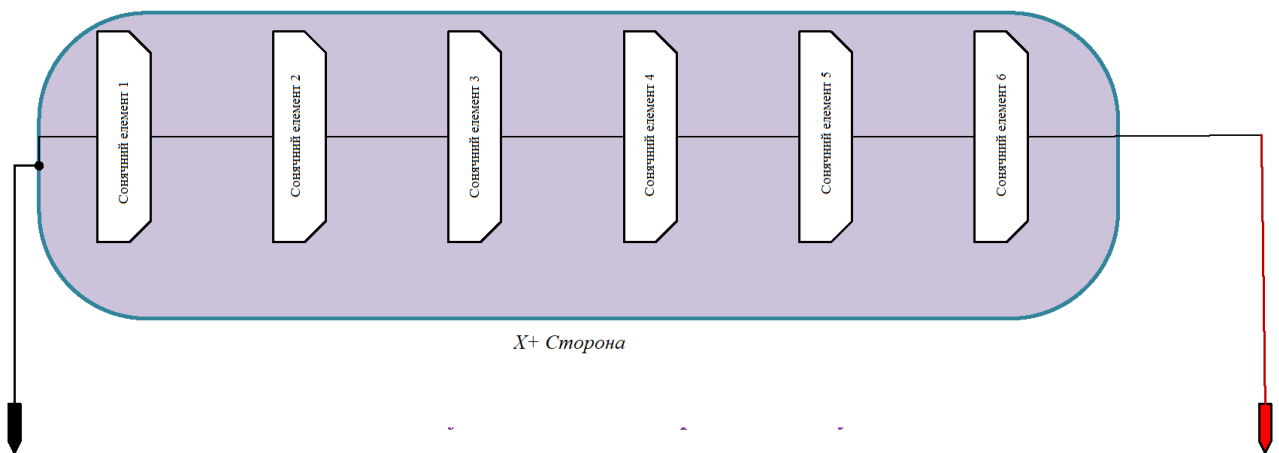


Рисунок 2.4 - Послідовне з'єднання сонячних елементів, відоме як режим S-подібного з'єднання

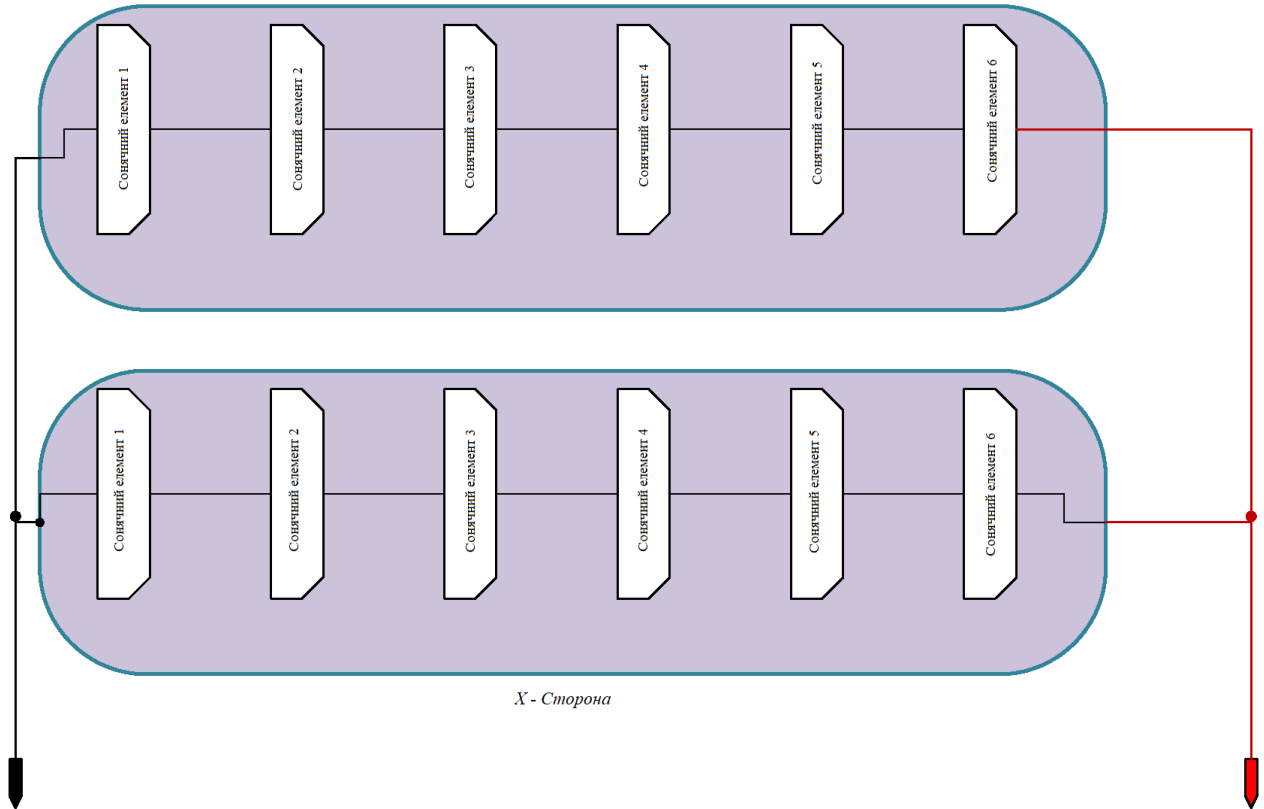


Рисунок 2.5 - Послідовно-паралельне з'єднання сонячних елементів, відоме як режим SP-з'єднання

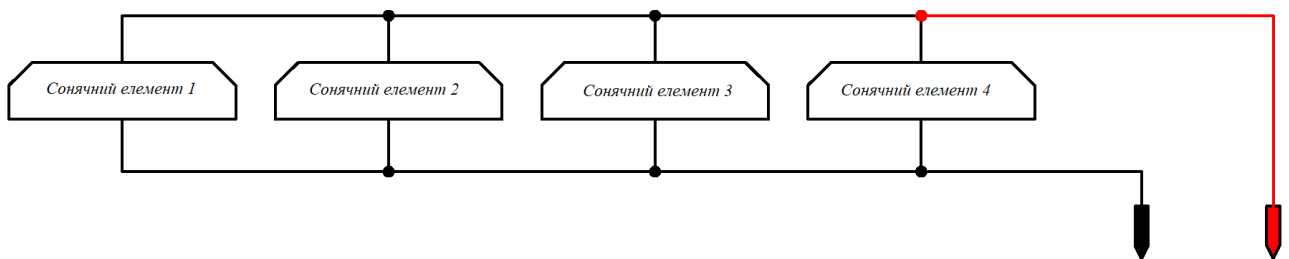


Рисунок 2.6 - Паралельне з'єднання сонячних елементів, відоме як режим P-з'єднання

Відповідно до схеми конфігурації, значення струму і напруги, що виробляються сонячними елементами, доступними у фотоелектричній системі, будуть відрізнятися від однієї схеми конфігурації до іншої. На практиці ці сонячні елементи демонструють нелінійну вихідну характеристику, яка називається вольт-амперною характеристикою (I-V), при певному рівні сонячного випромінювання і, крім того, при відомому рівні деградації.

Спочатку ці сонячні елементи встановлені таким чином, що їх можна легко розглядати як елементи певної матриці, що складається з $m \times n$ ідентичних сонячних елементів, з'єднаних за послідовно-паралельною схемою таким чином, щоб рівномірне сонячне випромінювання освітлювало їх під час перебування на орбіті. Послідовно-паралельна конфігурація була розроблена з урахуванням ідеальної моделі цих сонячних елементів, щоб можна було налаштувати їх на роботу в точках максимальної потужності, що сприятиме досягненню максимальної вихідної потужності всієї фотоелектричної системи, яка задовольнить потреби в енергії всіх корисних навантажень, підключених до блоку енергосистеми проектованого автономного пристрою.

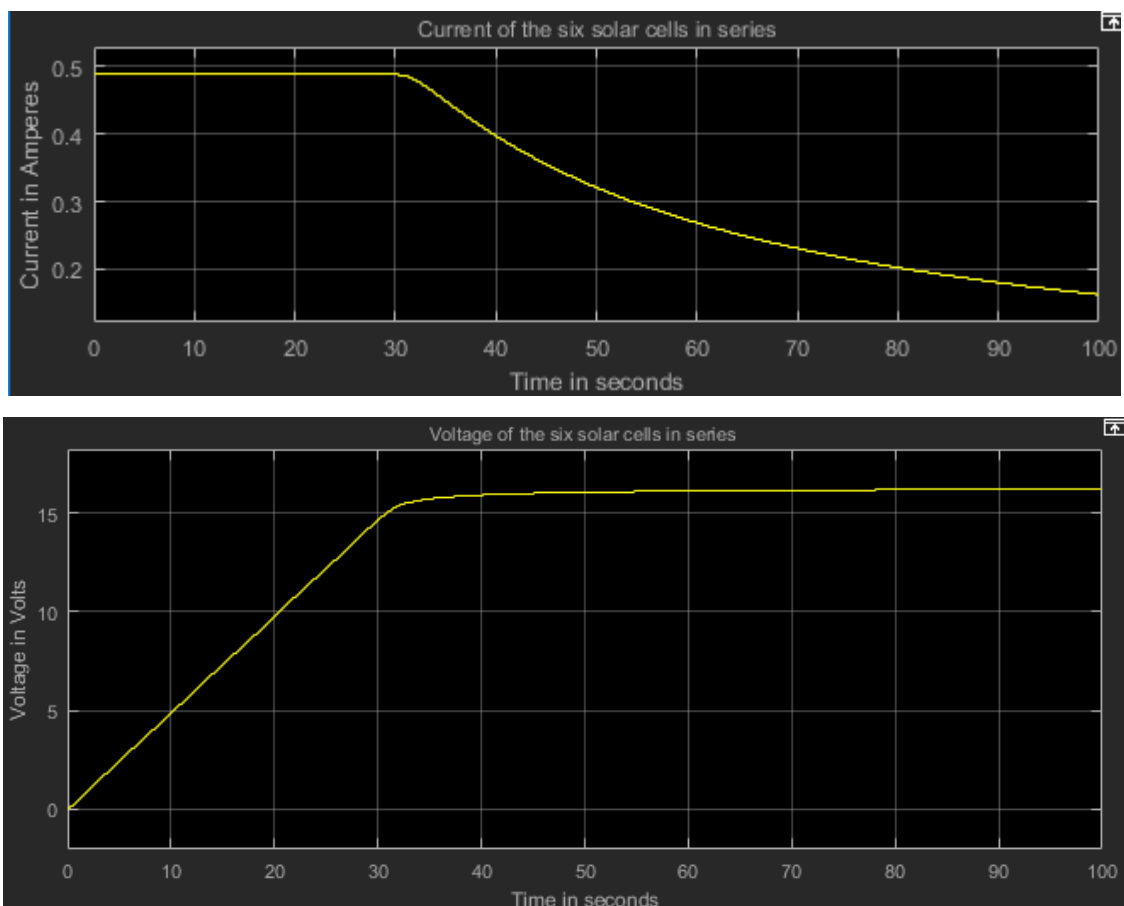


Рисунок 2.7 - Вольт-амперна характеристика лицьової панелі, виготовленої з 6 послідовно з'єднаних справних сонячних елементів ХТІ - з'єднання

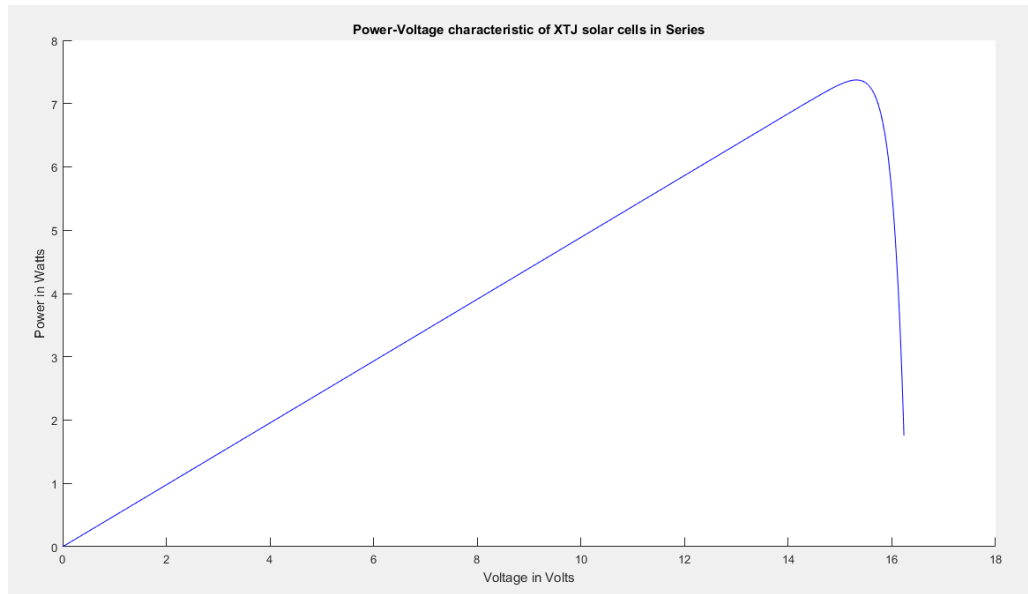
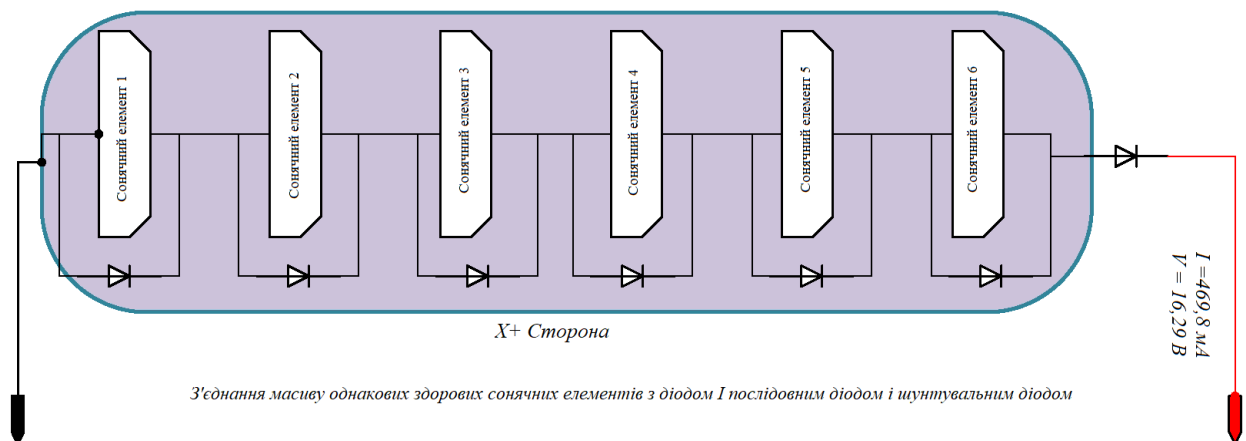


Рисунок 2.8 - Вольт-амперна характеристика лицьової панелі з 6 послідовно з'єднаних справних сонячних елементів XTJ - з'єднання



Багатоперехідний сонячний елемент XTJ_Prime з ефективністю 30,7 %
$V_{pk} = 2,715$ Вольт
$V_{mp} = 2,39$ Вольт
$I_{mp} = 469.8$ міліампер
$I_{кз} = 488.7$ міліампер
$P_{заг} = I_{заг} \cdot V_{заг} = 7.653042$ Вт

Рисунок 2.9 - Значення електричних параметрів та схематика послідовного з'єднання

Через ймовірність виходу з ладу цих сонячних елементів [11], використовуються послідовні діоди і шунтуючі діоди, щоб уникнути гарячих точок і неузгодженості, як показано на рис. 2.10.

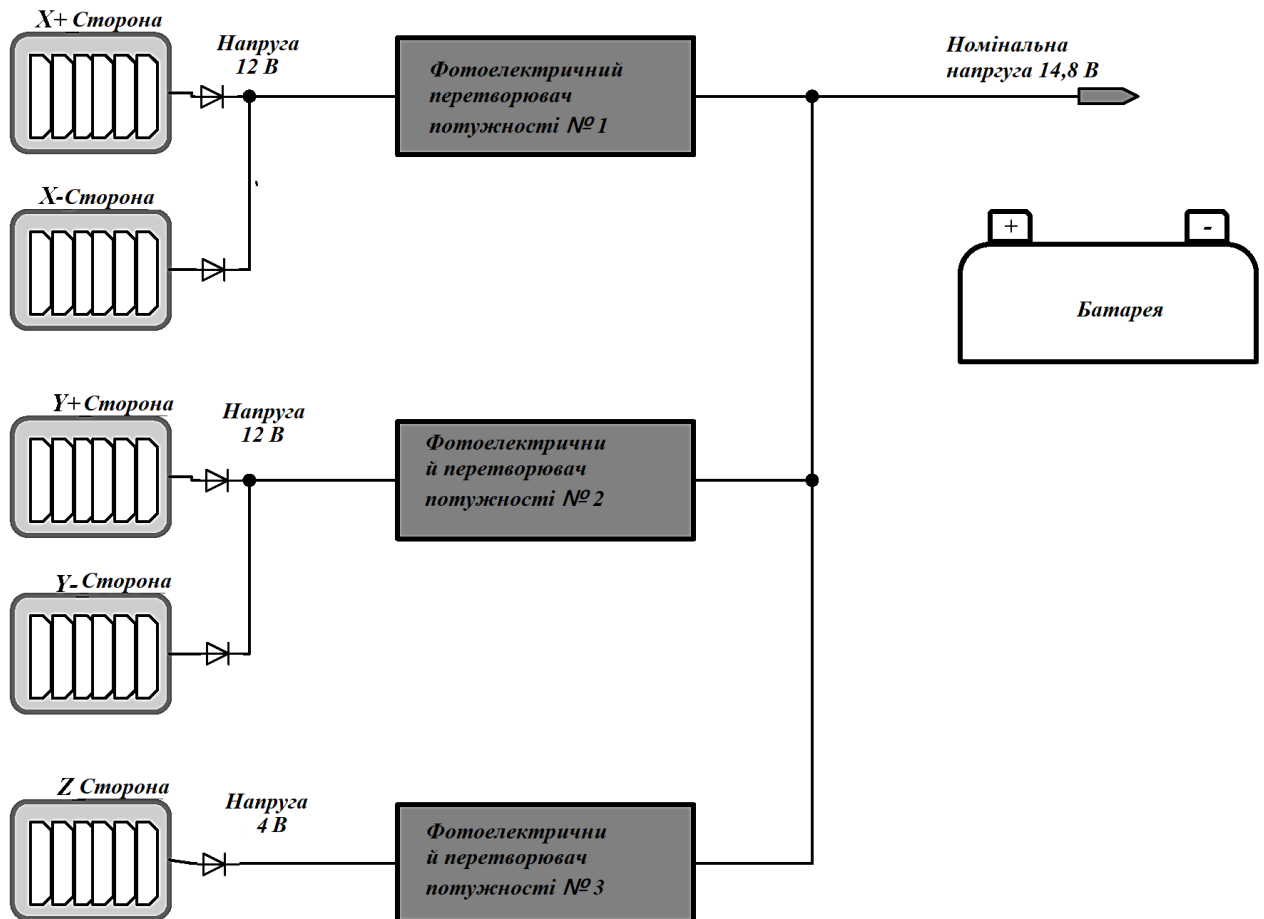


Рисунок 2.10 - Фотоелектрична система супутника 3 U-Nano з послідовними діодами

У гарячій точці, в разі невідповідності або в умовах деградації, деградовані сонячні елементи, встановлені на автономному пристрої, будуть відхилятися від своєї індивідуальної точки максимальної потужності, що потім сприятиме зниженню вихідної потужності всієї фотоелектричної системи.

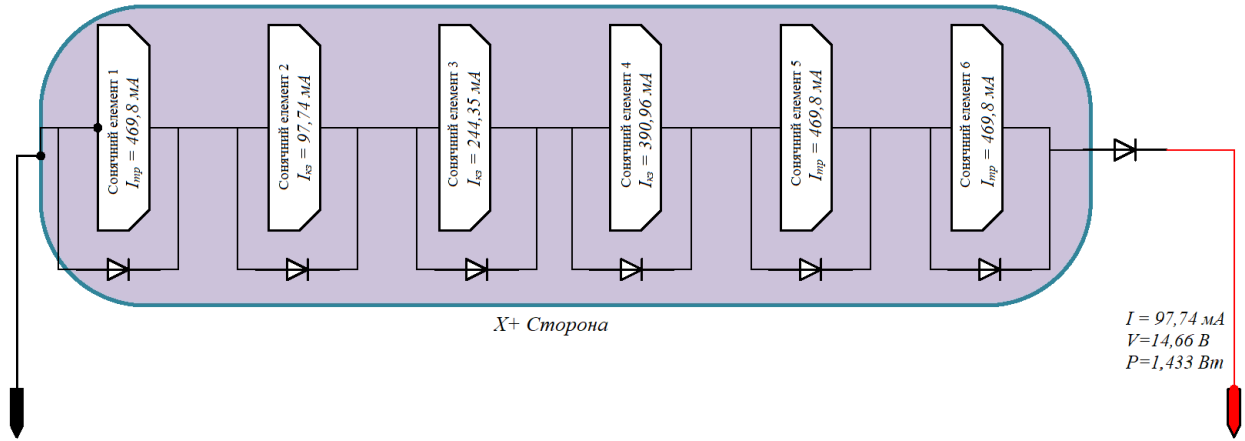


Рисунок 2.11 - Масиви сонячних елементів з 3 деградованими сонячними елементами серед них

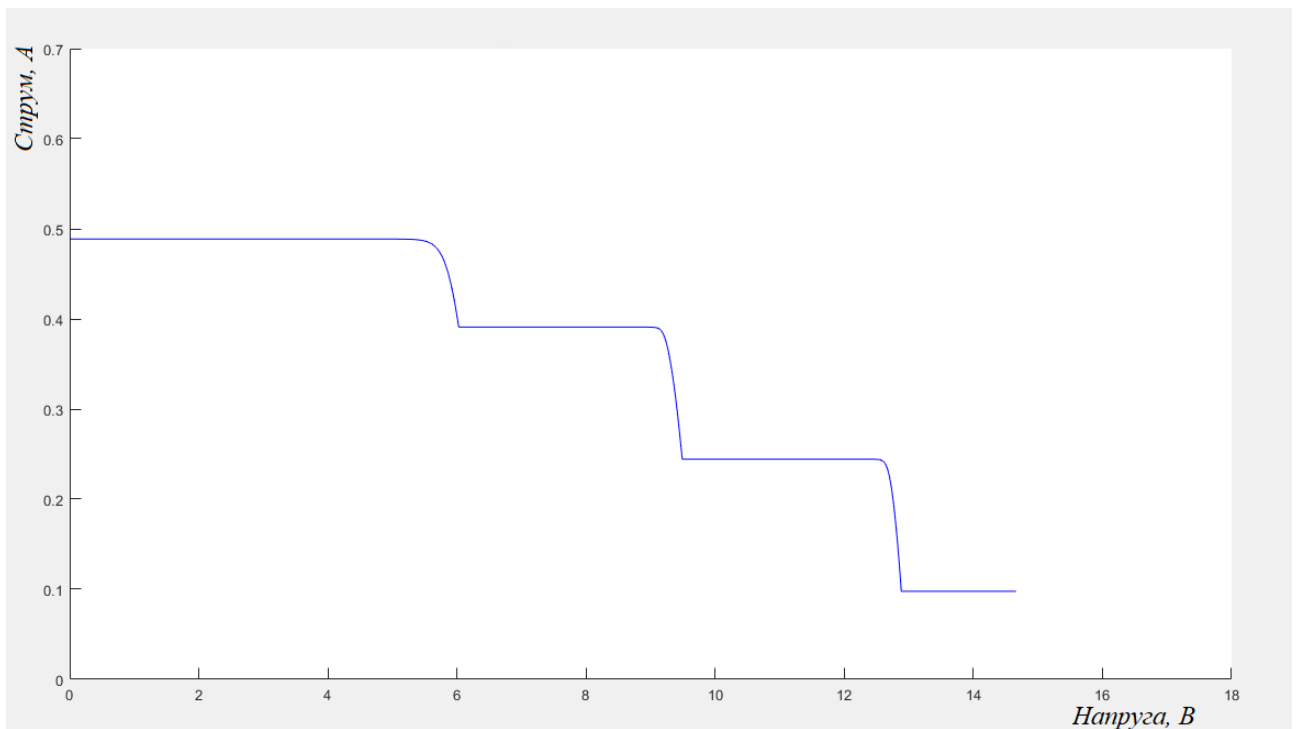


Рисунок 2.12 - Вольт-амперна характеристика фотоелектричної системи в умовах деградації

Оскільки деградація сонячного елемента відбувається нерівномірно, як показано на рис. 2.11, зміна струму короткого замикання від 0 мА до 488,7 мА впливатиме на поточну характеристику напруги сонячної батареї. Спочатку струм короткого замикання здорового сонячного елемента становить приблизно

0 мА. В процесі деградації вказане значення струму короткого замикання буде поступово зростати, поки не досягне 488,7 мА, що відповідає повністю деградованому сонячному елементу. За умов деградації, показаних на рис. 2.12, низький струм короткого замикання сонячного елемента матиме незначний вплив через зменшення загального струму сонячної батареї, але як тільки деградація наступного сонячного елемента буде більш ефективною, ніж попереднього, ефект нового деградованого сонячного елемента візьме гору над ефектом попереднього. Цей механізм призводить до того, що на рис. 2.12 характеристика напруги струму має вигляд спадаючої сходової діаграми.

Отже, основна формула електричної потужності сонячного елемента пропорційна його струму і його напрузі. Але на рисунку 2.12 показано зв'язок між цими двома параметрами, коли процес деградації відбувається на різних сонячних елементах. Таким чином, якщо на нормальний струм впливає величина струму, що протікає через шлях короткого замикання або діоди, то вплив величини струму короткого замикання матиме фізичний вплив на напругу живлення, що характеризує загальну потужність сонячної батареї з деградованим сонячним елементом, як показано на рис. 2.13. Тут потужність всієї здорової сонячної батареї зменшилася через деградовані сонячні елементи, які все ще під'єднані до сонячної батареї. Поступова деградація цих сонячних елементів означатиме поступове наближення до точки максимальної потужності сонячної батареї.

Хоча, неузгодженість, гарячі точки і деградація були подолані шляхом встановлення послідовних діодів і шунтуючих діодів. З інженерної точки зору це рішення стосується втрат потужності і падіння напруги, що генеруються вставленими діодами, виходячи з того, що збільшення втрат потужності блоків сонячних елементів автоматично знижує ефективність фотоелектричної системи. Відтепер, адекватний вибір розміру, схеми підключення фотоелектричної системи буде сприяти захисту від раптових значних змін вихідної потужності, які призводять до коливань фотоелектричної системи.

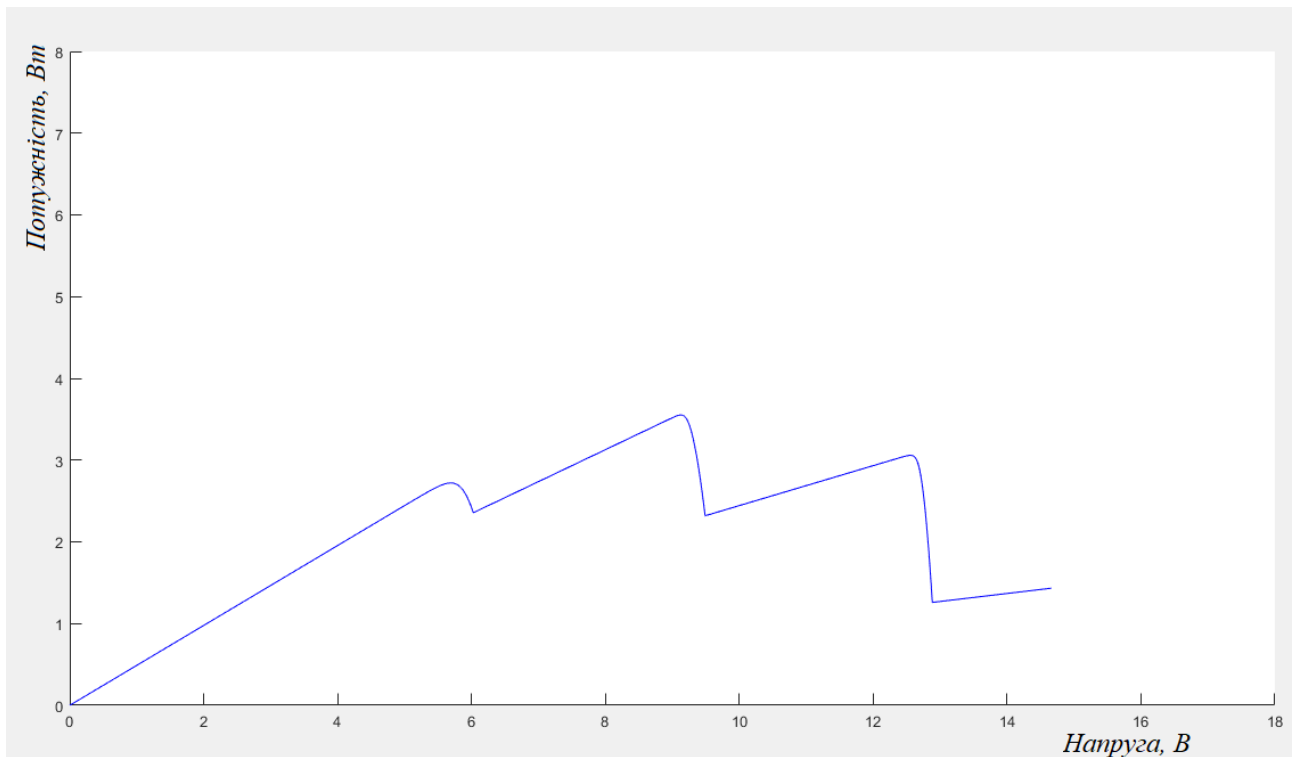


Рисунок 2.13 – Ват-вольтна характеристика фотоелектричної системи в умовах деградації

Тепер, коли ми побачили негативну сторону байпасних і послідовних діодів, що використовуються у фотоелектричній системі, зусилля і результати цього дослідницького проекту полягають у розробці стратегії динамічної реконфігурації, яка дозволить динамічно змінювати схему з'єднання сонячних елементів, що містяться у фотоелектричній системі наносупутникової енергосистеми, ефективними способами. Отже, це дозволить покращити вихідну потужність в умовах електричної невідповідності, спричиненої деградацією або будь-якими іншими проблемами. Звичайно, кожен модуль або субмодуль сонячних батарей може бути приєднаний до власного перетворювача з відстеженням точки максимальної потужності. Таким чином, буде досягнуто збільшення загальної ефективності фотоелектричної системи, незважаючи на те, що в енергосистемі наносупутника (автономного пристрою) буде використовуватися або вставлятися величезна кількість перетворювачів постійного струму в постійний. Електричні характеристики інших схем

з'єднання, відмінних від схем з'єднання елементів, були досліджені і порівняні, наприклад:

- Схема з'єднання з повним перехресним зв'язком, відома як схема ТСТ-з'єднання
- Схема з'єднання з мостовим зв'язком, відома як схема ВL-з'єднання
- Гібридна схема з'єднання, відома як схема НС-з'єднання

2.3 Схема з'єднання з повним перехресним зв'язком

Схема з'єднання з загальним перехресним зв'язком - це, по суті, вдосконалений або реалізований режим послідовно-паралельного з'єднання сонячних елементів, де зв'язки з'єднуються через кожен ряд з'єднань простого режиму послідовно-паралельного з'єднання масиву сонячних елементів. Позитивним моментом є те, що схема з повним перехресним з'єднанням сприяє зменшенню комплексних ефектів невідповідності та деградації сонячних елементів.

Фотоелектрична система, що складається з матриці сонячних елементів розміром 4 на 4, може бути з'єднана між собою за схемою повного перехресного з'єднання, як показано на рис. 2.14.

2.4 Схема з'єднань з мостовими зв'язками

По суті, схема мостових з'єднань отримується шляхом скорочення деяких з'єднань, знайдених в загальній схемі з'єднань з перехресними зв'язками, як показано на рис. 2.15.

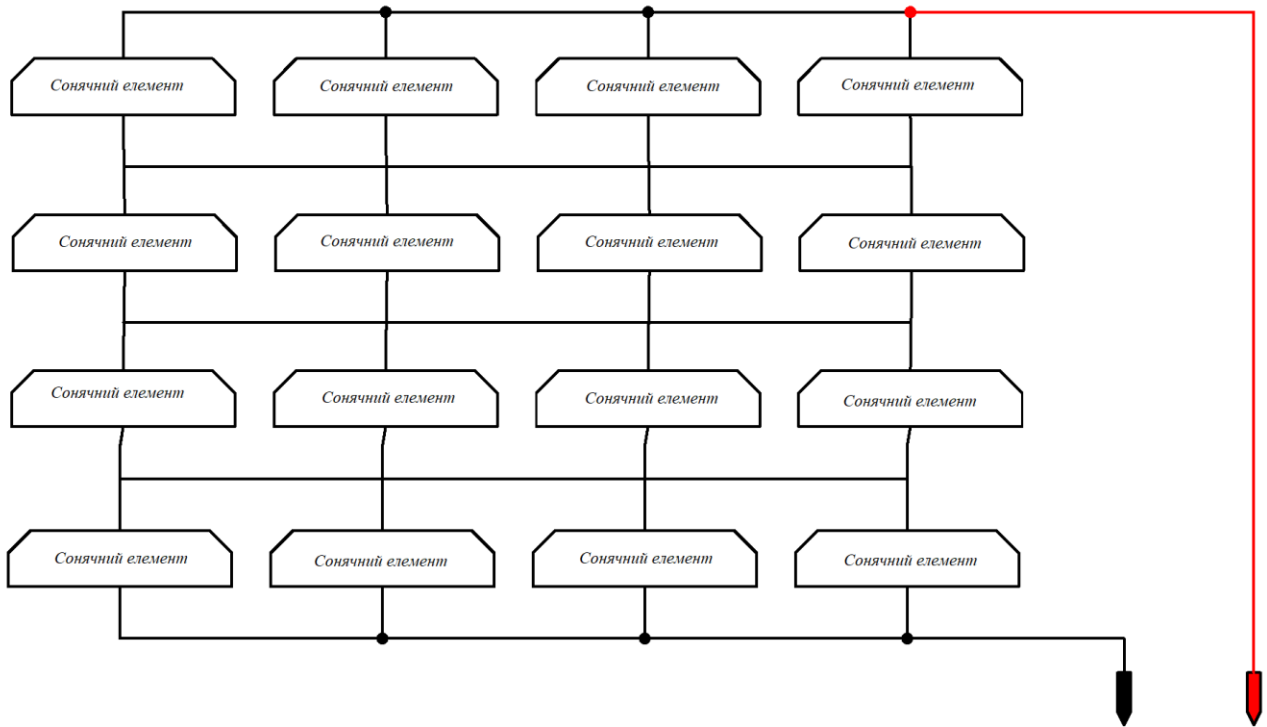


Рисунок 2.14 - Схема з'єднання з повним перехресним зв'язком (Total-Cross-Tied)

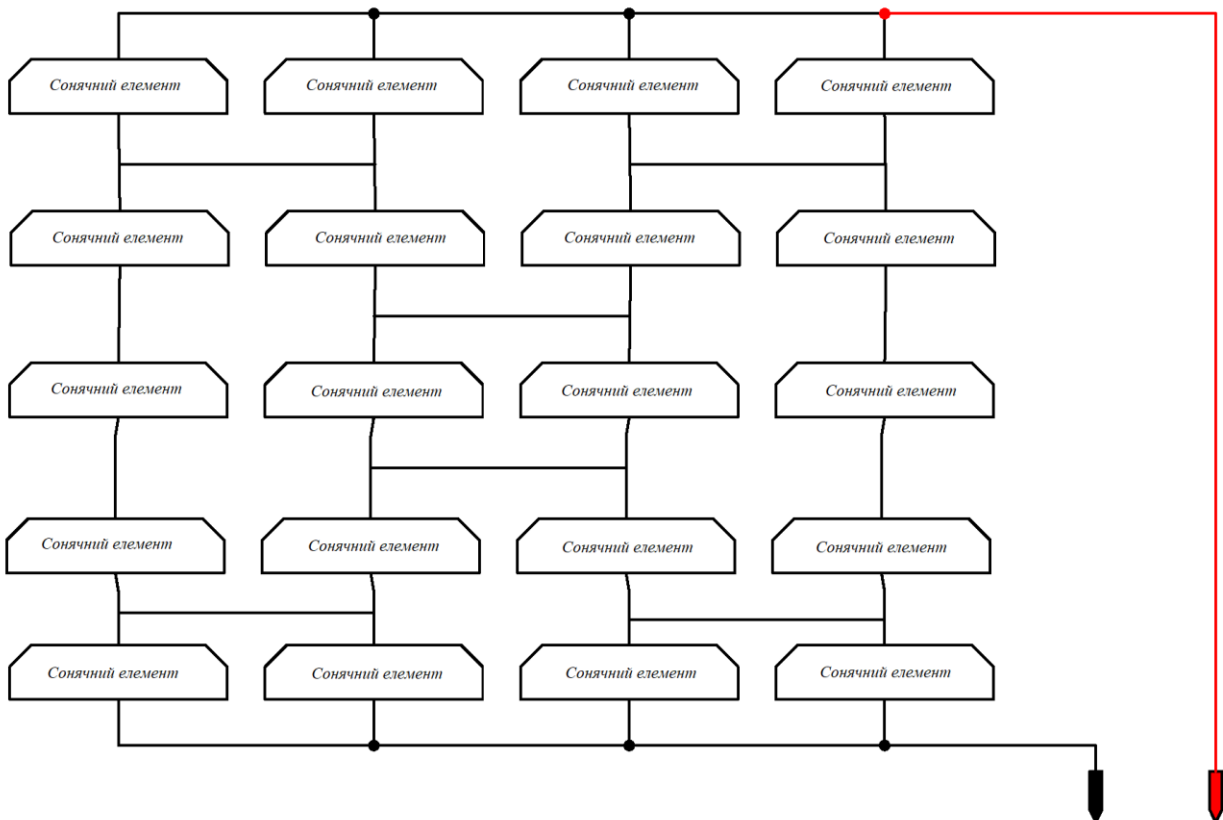


Рисунок 2.15 - Схема мостового з'єднання (Bridge-Linked)

Правильне розуміння наведеної вище схеми призведе до того, що комірки, доступні в цій конкретній схемі, з'єднані в базовій схемі мостового випрямляча. Використовуючи концепцію мостового випрямляча, ми помітимо, що міст складається з чотирьох сонячних елементів. Крім того, між мостами додаються зв'язки для з'єднання між собою. Маючи на увазі, що в мостовому випрямлячі два сонячні елементи, по-перше, з'єднані послідовно один від одного, а по-друге, з'єднані паралельно, що дасть своєрідне послідовно-паралельне базове з'єднання в схемі мостового випрямляча.

2.5 Схема з'єднання гібридної конфігурації

Гібридна конфігурація, яку також називають схемою з'єднання "медові соти", є результатом модифікацій, виконаних у схемі мостового з'єднання, згаданої в попередньому параграфі (рис. 2.16).

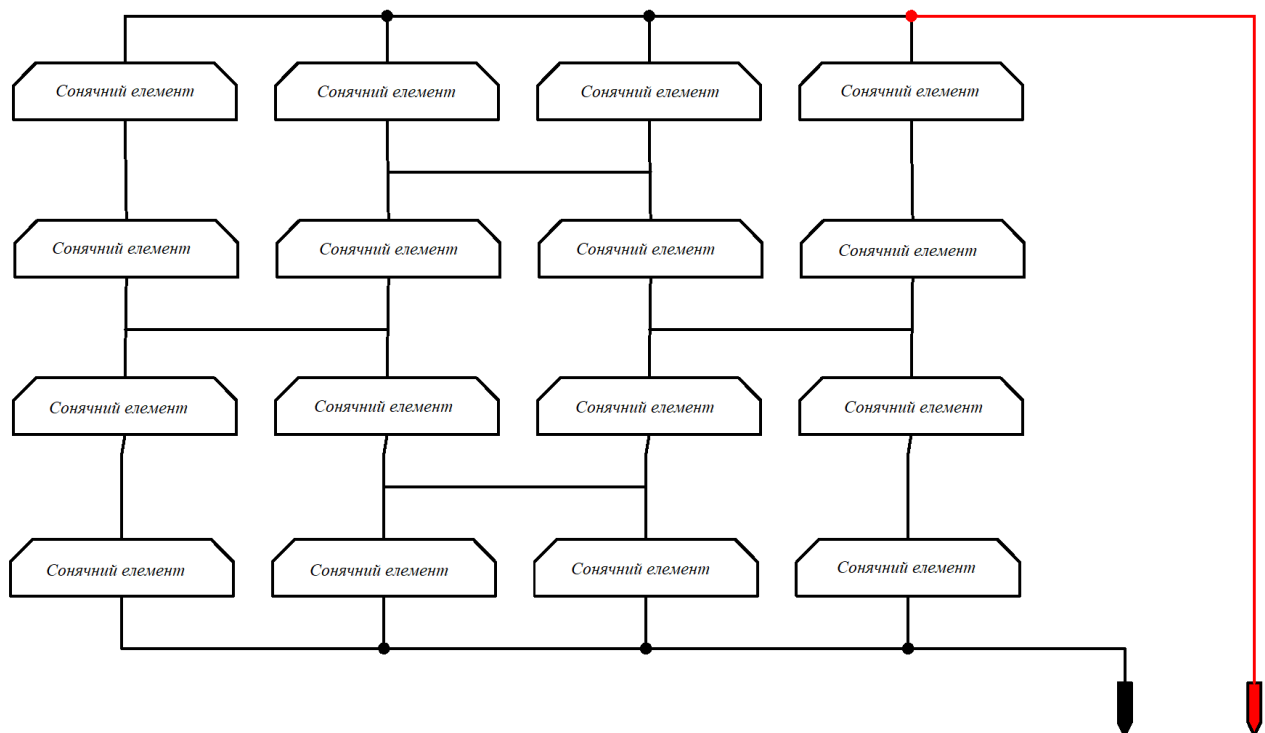


Рисунок 2.16 - Схема з'єднання "медові соти" (Honey-Comb)

Ця схема є поєднанням переваг, отриманих при використанні схеми з'єднання з загальним перехресним зв'язком і схеми з'єднання з мостовим

зв'язком. Крім того, гібридна конфігурація також забезпечує послідовно-паралельне з'єднання на додаток до тих, що надаються схемою з'єднання з загальним перехресним зв'язком і мостовою схемою з'єднання. Схема з'єднання гібридної конфігурації може бути намальована для фотоелектричної системи з 4 сонячних елементів, як показано на рис. 2.16.

2.6 Висновки до розділу

1. Проведено аналіз методів визначення деградованих сонячних елементів. Визначено їх переваги та недоліки.
2. Розглянуто та проаналізовано декілька схем з'єднання сонячних елементів з використанням шунтувальних (байпасних) і послідовних діодів.
3. В результаті проведених досліджень встановили негативну особливість байпасних і послідовних діодів, що використовуються у фотоелектричній системі.
4. Запропоновано схеми з'єднання сонячних елементів без діодів за трьома способами: схема з'єднання з повним перехресним зв'язком; схема з'єднання з мостовим зв'язком; гібридна схема з'єднання.

3 РОЗРАХУНКОВО-ДОСЛІДНИЦЬКИЙ РОЗДІЛ

3.1 Несправності, що виникають у фотоелектричних системах

У попередніх розділах висвітлено процес роботи фотоелектричної системи генерації електроенергії автономного пристрою та її елементів. Отже сонячні елементи є одним з основних елементів фотоелектричної системи і перетворення сонячного світла в електроенергію за допомогою фотоелектричних елементів залежить від багатьох факторів. Слід постійно записувати або контролювати дані, що генеруються системою фотоелектричного електрогенератора, щоб чітко бачити або розуміти, чи працює використовувана система правильно і чи є вона ефективною. Більш того, погана ефективність фотоелектричної системи або фотоелектричних елементів може бути отримана, якщо у фотоелектричній системі є несправність, що призведе до постійних втрат електроенергії в системі. Таким чином, моніторинг параметрів фотоелектричних елементів допоможе виявити, чи сталася несправність в системі. За таких обставин необхідно провести відповідний аналіз і застосувати відповідне з'єднання фотоелектричних модулів для удосконалення вихідної потужності системи сонячних елементів.

Було проведено багато аналітичних досліджень, які фактично продемонстрували численні типи відмов, що виникають у фотоелектричних системах та фотоелектричних елементах. З інженерної та наукової точки зору, наявність несправностей у фотоелектричних елементах розширить інтерес до досліджень в області моніторингу, виявлення несправностей і оптимізації сонячних елементів через важливість створення ефективного і надійного генератора фотоелектричної системи за найнижчою вартістю для космічних застосувань. Під час експлуатації сонячного елемента на сонячному елементі можуть виникати перераховані нижче несправності, що призводять до втрат потужності:

- Зміна кольору етиленвінілацетату протягом нормального терміну служби сонячного елемента, відома як пожовтіння етиленвінілацетату і побуріння етиленвінілацетату;

- Розшарування, яке виникає при розриві зв'язку між пластиком, розміщеним на задній панелі, і склом, розміщеним на передній панелі сонячного елемента;

- Бульбашки, що утворюються в процесі ламінування сонячних модулів;

- Тріщини в сонячних елементах, які можуть виникнути в результаті механічних і термічних навантажень, яким піддаються сонячні елементи під час транспортування або монтажу;

- Дефекти антивідбиваючого покриття, що розглядаються як дефектний тип оптичного покриття, що наноситься на поверхню сонячних елементів для зменшення відбиття;

- Гарячі точки, спричинені тим, що панель працює як навантаження, коли в масиві сонячних елементів, що складається принаймні з декількох сонячних елементів з високим струмом короткого замикання, є слабкострумовий сонячний елемент;

- Розшарування крайових ущільнювачів, встановлених по периметру фотоелектричних технологій, щоб запобігти проникненню вологи з боків;

- Нові тріщини на сонячних елементах, які також розглядаються як мікротріщини, що виникають в сонячних елементах;

- Розшарування над сонячними елементами та з'єднаннями;

- Ізоляція тріщин над сонячними елементами та з'єднаннями;

- Виділяються з'єднання;

- Деградація з часом, що передбачає значне падіння струму.

Відповідно до наведеного вище переліку несправностей, які можуть бути виявлені на сонячному елементі, з нього можуть впливати різні типи методів виявлення несправностей щодо параметрів, які будуть використовуватися для виявлення несправності в даному конкретному сонячному елементі. На даний момент, під час наявності однієї з цих виділених несправностей у

фотоелектричній системі, блок відстеження точки максимальної потужності буде захищений шляхом спрацьовування пристроїв захисту фотоелектричної системи. Деградація сонячних елементів з часом буде несправністю, яка розглядається в даній роботі і системи виявлення несправностей, що дозволить створити відповідну схему з'єднання між здоровими сонячними елементами, щоб ми могли оптимізувати вихідну потужність фотоелектричної системи.

3.2 Деградація фотоелектричної системи

3.2.1 Види деградації

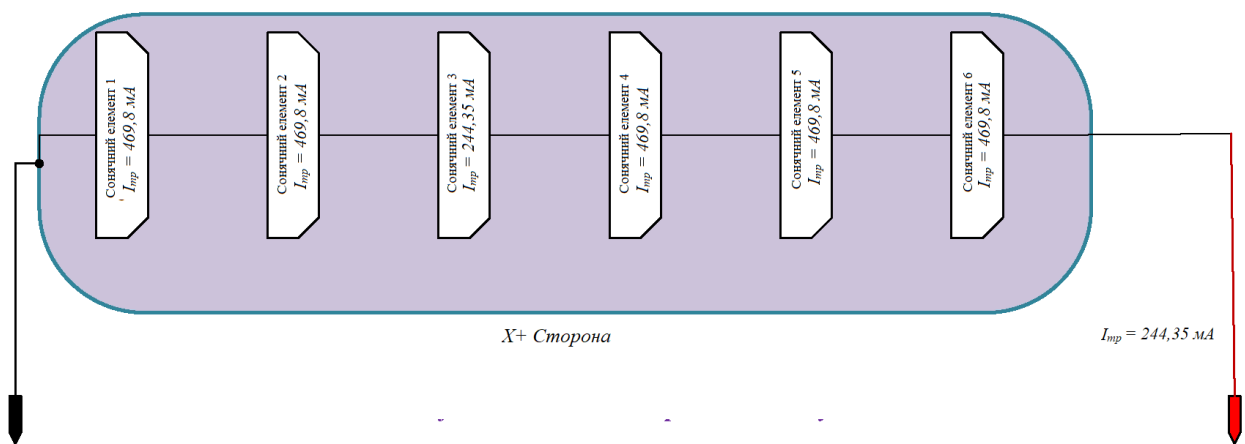
У фотоелектричному елементі фотоелектрична деградація може виникати різними способами. Таким чином, краще розуміння цих шляхів фотоелектричної деградації необхідно перед пошуком методу моніторингу, виявлення фотоелектричної деградації, який може сприяти зменшенню або усуненню ефекту фотоелектричної деградації у фотоелектричній системі. На сьогоднішній день деякі спостережувані способи фотоелектричної деградації, що спостерігаються в сонячних елементах, можна перерахувати нижче [12]:

- Забруднення передньої поверхні;
- Оптична деградація;
- Деградація сонячних елементів;
- Невідповідні сонячні елементи;
- Деградація, викликана світлом;
- Деградація, спричинена температурою

3.2.2 Забруднення передньої поверхні

Передня поверхня сонячного елемента може бути зруйнована, якщо на верхній поверхні сонячного елемента накопичується бруд. Цей процес може відбуватися під час складання або транспортування автономного пристрою до його запуску. Як наслідок, вихідна потужність сонячного елемента може

знизитися до десяти відсотків від його нормованої вихідної потужності в умовах забруднення передньої поверхні. Через накопичення бруду на верхній поверхні сонячного елемента, частково затінений сонячний елемент виробляє менший струм, ніж інші елементи, що містяться в тому ж масиві сонячних елементів. Це призводить до низького загального струму масиву сонячних елементів, як показано на рисунку нижче:



Багатоперехідний сонячний елемент ХТJ_Prime з ефективністю 30,7%

$$V_{pk} = 2,715 \text{ Вольт}$$

$$V_{mp} = 2,39 \text{ Вольт}$$

$$I_{mp} = 469,8 \text{ міліампер}$$

$$I_{кз} = 488,7 \text{ міліампер}$$

Рисунок 3.1 - Вплив забруднення верхньої поверхні сонячного елемента в масиві сонячних елементів

Через зменшення потужності масиву сонячних елементів внаслідок впливу забрудненого сонячного елемента, цей тип деградації сонячного елемента можна виявити шляхом візуального огляду сонячного елемента і на місці.

3.2.3 Оптична деградація

Наслідком впливу ізоляційного матеріалу може бути оптична деградація. Це явище може бути пов'язане з впливом поглинання світла на сонячні елементи під час перебування у відкритому космосі. Вплив ультрафіолету, температури або вологості після тривалого періоду експозиції може призвести до пожовтіння інкапсулюючого матеріалу, який називається етиленвінілацетат. Згодом етиленвінілацетат перетвориться з жовтого на коричневий. Крім того, коричневий етиленвінілацетат поглинає величезну частину сонячного світла в ультрафіолетовій і видимій області, тому необхідний доступний фотон, відповідальний за поточну генерацію, зменшується, що призведе до зниження продуктивності сонячного елемента на п'ятдесят відсотків. Оптичний вплив етиленвінілацетату на ефективність сонячних елементів можна виявити, освітлюючи сонячний елемент ультрафіолетовою лампою.

3.2.4 Деградація сонячних елементів

Використовуючи еквівалентну схему сонячного елемента з двома діодами, показану на рисунку 3.2, можна спровокувати режим деградації сонячного елемента на основі трьох факторів, перелічених нижче:

- Збільшення послідовного опору сонячного елемента: зазначається, що послідовний опір сонячного елемента складається з опорів у паяних з'єднаннях сонячних елементів, емітера та опорів у з'єднувальній коробці його терміналу. Застосовуючи закон Ома, збільшення значення цього опору призведе до збільшення падіння напруги на ньому і, як наслідок, до зменшення напруги, що виробляється сонячним елементом. Таким чином, процес моніторингу темного струму за допомогою вимірювання струму-напруги допоможе виявити збільшення послідовного опору сонячного елемента;

- Зменшення опору шунта сонячного елемента: який означає будь-який паралельний шлях великої провідності сонячного елемента. Збільшення

шунтуючого струму буде отримано при зменшенні значення опору шунта, що також призведе до зменшення струму навантаження, що протікає через послідовний опір сонячного елемента. Значення шунтуючого струму можна контролювати, якщо підключити щуп датчика до опору шунта сонячного елемента, щоб відчувати його значення у випадку, якщо може відбутися значна зміна;

- Погіршення антивідбиваючого покриття: низька відбивна здатність сонячного елемента покращує як параметри струму короткого замикання, так і параметри напруги відкритого замикання. Відтепер буде спостерігатися покращення ефективності сонячного елемента. Таким чином, шляхом вимірювання та моніторингу обох параметрів можна виявити пошкодження сонячного елемента через погіршення антивідбиваючого покриття.

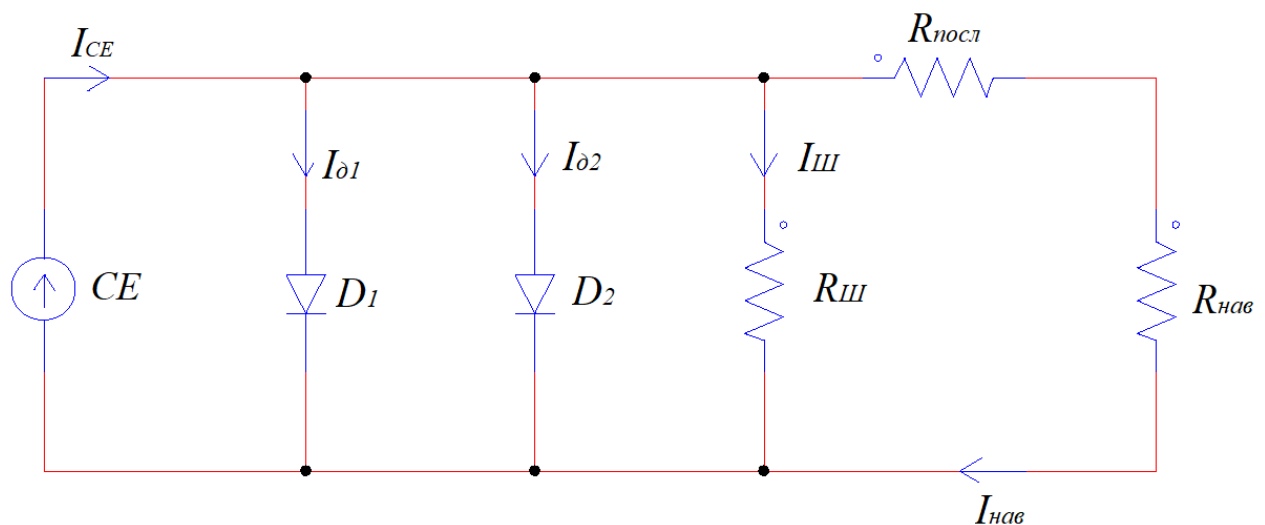


Рисунок 3.2 - Еквівалентна схема сонячного елемента з використанням моделі двох діодів

3.2.5 Пошкоджені (деградовані) сонячні елементи

Забруднення передньої поверхні, деградація капсули, погіршення антиблікового покриття, виробничі дефекти, розтріскування мікроелементів

сонячних батарей, спричинене тепловим навантаженням і градом, часткове затінення можуть бути факторами, що спричиняють невідповідність сонячних елементів у фотоелектричній системі. Погіршення продуктивності масиву сонячних елементів буде наслідком невідповідності сонячних елементів в масиві сонячних елементів. Це явище практично спостерігається через розсіювання тепла невідповідних сонячних елементів. На утворення гарячих точок, що утворюються через невідповідність умов, впливають певні фактори, які наведені нижче:

- Ефективність сонячної батареї;
- Напруга холостого ходу сонячної батареї;
- Струм короткого замикання сонячного елемента;
- Максимальна потужність сонячного елемента;
- Коефіцієнт заповнення сонячного елемента.

Виявлення режиму деградації цього типу сонячних елементів може бути виконано за допомогою одного з методів, перерахованих нижче:

- Візуальний огляд;
- Вимірювання струму-напруги;
- Випробування на витривалість в гарячих точках;
- Індивідуальний моніторинг температури сонячного елемента під час роботи сонячного елемента в режимі прямого зміщення.

3.2.6 Світло-індукована деградація

Вплив світла на сонячний елемент викликає явище генерації та рекомбінації електронів і дірок. Під час процесу рекомбінації вивільнена енергія може бути відповідальною за деякі розриви слабких зв'язків в області виснаження сонячного елемента. Важливо розуміти, що метастабільні дефекти утворюються з цих розірваних зв'язків, і збільшення кількості дефектів погіршує якість матеріалу, що буде пов'язано з погіршенням продуктивності

сонячного елемента. З іншого боку, індуковану світлом деградацію сонячного елемента можна виявити за допомогою наступного процесу:

- Безперервний процес моніторингу параметрів струму короткого замикання і напруги відкритого замикання сонячного елемента.
- Періодичне вимірювання поточних вольтамперних характеристик сонячного елемента.

3.2.7 Деградація, спричинена температурою

Зменшення ширини забороненої зони сонячного елемента зазвичай спостерігається під час роботи сонячного елемента при високих температурах, що пов'язано з поглинанням фотонів з більшою довжиною хвилі. Аналогічно, підвищення температури призводить до збільшення часу життя неосновних носіїв. Зміна як температури, так і часу життя неосновних носіїв призведе до збільшення струму, що генерується світлом, і, отже, струм короткого замикання також збільшиться. Можна відзначити експоненціальне зменшення струму насичення зі збільшенням температури. Таким чином, вимірювання температурної залежності сонячних елементів можна використовувати для визначення зміни температурного коефіцієнта.

3.3 Аналіз деградації у фотоелектричній системі

Після детального дослідження типів режимів деградації, що відбуваються в сонячному елементі, тепер можемо зрозуміти і ідентифікувати деградований сонячний елемент у фотоелектричній системі, використовуючи один з методів, наведених у попередньому розділі. Підсумовуючи, слід зазначити, що для виявлення деградованого сонячного елемента можна використовувати різні процедури, такі як [12]:

- Комплексний візуальний огляд: для цього необхідно зробити знімки сонячного елемента, щоб шляхом візуального порівняння виявити такі

несправності, як тріщини, неадекватні з'єднання, потемніння сонячного елемента і утворення гарячих точок. Цей метод буде дорогим для космічних застосувань через те, що для отримання необхідних фотографій над сонячними елементами потрібно встановити додаткові камери;

- Вимірювання вольт-амперних характеристик: у цьому випадку вольт-амперні характеристики сонячного елемента потрібно знімати перед встановленням на відкритому повітрі за стандартних умов. Таким чином, зібрані характеристики будуть важливими для виявлення будь-яких несправних сонячних елементів через ефект деградації, оскільки вимірювання буде проводитися в повторюваній послідовності через заданий фіксований інтервал часу після кожного вимірювання. За допомогою цього методу отримують значення струму короткого замикання, значення напруги відкритого стану, максимальну потужність сонячного елемента;

- Вимірювання темного струму-напруги;
- Вимірювання опору шунта;
- Дослідження гарячих точок;
- Вимірювання температурної залежності;
- Моніторинг параметрів струму короткого замикання та напруги відкритого замикання.

Для досягнення мети цієї кваліфікаційної роботи було використано безперервний процес моніторингу струму короткого замикання для виявлення деградованого сонячного елемента. Виміряний струм короткого замикання буде порівнюватися з заданим значенням струму короткого замикання за стандартних умов.

3.4 Виявлення деградованих сонячних елементів у фотоелектричній системі

3.4.1 Виявлення деградованого сонячного елемента за допомогою струму короткого замикання

Через те, що зменшення напруги холостого ходу призводить до зменшення параметра струму короткого замикання, його можна

використовувати як первинне сповіщення про деградацію сонячного елемента в масиві сонячних елементів. Практично, деградований сонячний елемент буде мати ненульовий струм, що протікає через його шунтуючий діод. Таким чином, вимірювання струму, що протікає через шунтуючий діод сонячного елемента, може допомогти виявити стан сонячного елемента - деградований він чи здоровий. Крім того, можна виміряти напругу холостого ходу кожного сонячного елемента, щоб полегшити аналіз деградації вимірюваного сонячного елемента. У той же час, схема або вбудована система, що виконує перевірку стану розімкнутого контуру вимірюваного сонячного елемента, повинна бути надійною і ефективною, щоб дозволити отримати правильні дані про виміряну напругу.

Струм короткого замикання буде використовуватися для визначення стану деградації сонячних елементів, що формують фотоелектричну систему автономного пристрою. З метою експериментальної розробки апаратного забезпечення, яке буде використовуватися для виконання алгоритму виявлення несправностей і схеми перемикання реконфігурації для максимізації виробленої вихідної потужності щодо наявності деяких деградованих сонячних елементів у сонячній батареї, буде використано пристрій з високим боковим струмом, встановлений поперек кожного сонячного елемента для вимірювання струму, що протікає через паралельний шлях або обхідний діод кожного сонячного елемента, як показано на рис. 3.3.

Для проектування експериментального обладнання, обраний датчик струму високої сторони ZXCT1009FTA. Завдяки невеликим розмірам компонентів датчика струму, вони можуть бути легко встановлені на борту автономного пристрою без будь-яких обмежень за габаритами та вагою. Крім того, для реалізації реконфігурованого алгоритму було використано сонячну батарею AZL на 6 вольт, 330 мА і 2 вати. Тому практично вирішили перетворити струм короткого замикання сонячного елемента у вихідну напругу постійного струму 3,4 вольт. Відповідно, чутливий резистор буде підібрано

таким чином, щоб чутлива напруга змінювалася в межах від 0,5 вольт до 5 вольт при повному навантаженні.

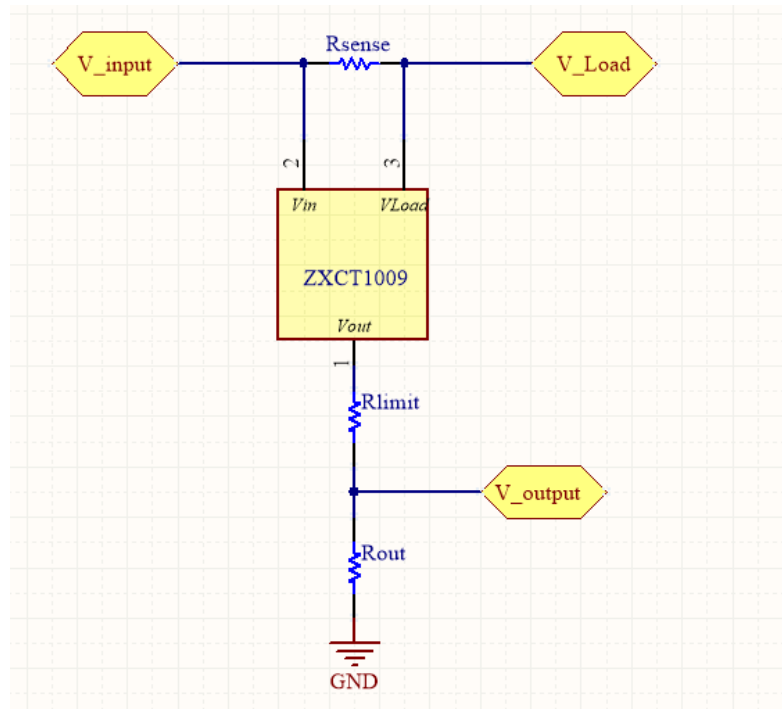


Рисунок 3.3 - Односпрямована система вимірювання струму короткого замикання блоку сонячних елементів

$$V_{sense} = R_{sense} \cdot I_{\text{короткозамкнене_повне_навантаження}} \quad (3.1)$$

$$R_{sense} = \frac{V_{sense}}{I_{\text{короткозамкнене_повне_навантаження}}} = \frac{3.4 \text{ В}}{3.34 \cdot 10^{-3} \text{ А}} = 100 \text{ Ом} \quad (3.2)$$

$$R_{output} = \frac{V_{output}}{V_{sense} \cdot 0.01} = \frac{3.4}{3.4 \cdot 0.01} = 100 \text{ Ом}. \quad (3.3)$$

Максимальне значення додаткового струмообмежувального резистора залежить від значення мінімальної вхідної напруги, максимальної вихідної напруги і напруги падіння датчика струму пристрою. Цей струмообмежувальний резистор можна ігнорувати, якщо перехідні процеси

вхідної напруги не мають значного впливу на вихідну напругу. Використовуючи рівняння (3.3), можемо переконатися в цьому:

$$V_{output} = R_{output} \cdot V_{sense} \cdot 0.01 \quad (3.4)$$

Замінивши вираз V_{sense} на вираз, отриманий у рівнянні (3.1), отримаємо

$$V_{output} = R_{output} \cdot R_{sense} \cdot I_{короткозамкнене_повне_навантаження} \cdot 0.01 \quad (3.5)$$

Відтепер кожна виміряна і вихідна напруга з кола високого рівня буде порівнюватися з певним заданим значенням для визначення стану деградації виділеного сонячного елемента, а всі дані вимірювань, зібрані з кожного сонячного елемента фотоелектричної системи, будуть записуватися в пам'ять, щоб зчитані значення могли бути використані для обчислення алгоритму виявлення деградації, що є його основним завданням, і, отже, буде продовжувати алгоритм обходу деградованих сонячних елементів за допомогою силових електронних перемикачів з низьким логічним рівнем.

3.4.2 Алгоритм виявлення деградованих сонячних елементів

Надійність фотоелектричного блоку живлення є дуже важливою в наш час, особливо для автономних космічних пристроїв. Раніше, в роботі, висвітлено можливі несправності, які можуть виникнути на фотоелектричному елементі, що є компонентом фотоелектричного блоку живлення. Насправді, несправності фотоелектричних сонячних елементів можна визначити як несправності, спричинені під час:

- процесу встановлення;
- несприятливого впливу сонця на поверхню фотоелектричного елемента;
- деградації фотоелектричного матеріалу.

Іншим ключовим моментом є значення несправного фотоелемента у фотоелектричному модулі, який є лише еквівалентом обриву кола в місці

розташування несправного фотоелемента. Несправний фотоелектричний елемент перевищує зворотне зміщення на інші фотоелектричні елементи, які складають фотоелектричний модуль або групу фотоелектричних елементів. Наслідком такої ситуації є збільшення гарячих точок у фотоелектричних елементах, що може призвести до збільшення кількості несправних фотоелектричних елементів в системі. Вирішенням цього питання може бути інтеграція шунтуючих діодів з фотоелектричними елементами.

Нами використано метод, за допомогою якого шунтувальні діоди можна замінити малопотужними електронними перемикачами, щоб зменшити втрати потужності шунтувальних діодів у фотоелектричному модулі. Це пов'язано з тим, що різке падіння вихідної потужності, яке спостерігається у фотоелектричній системі через наявність несправних сонячних елементів, не було компенсовано шунтуючими діодами. Важливо відзначити, що втрата вихідної потужності через несправні фотоелектричні елементи набагато більша, ніж можна було б очікувати, просто підрахувавши кількість справних і несправних елементів. Насправді, деградація вихідної потужності через один несправний фотоелемент становить 16,5 %, виходячи з того, що фотоелектричний модуль не може продовжувати працювати на своїй максимальній потужності, коли збалансована структура фотоелектричного модуля порушена деградаційними дефектами [14]. Реалізація ручного виявлення та усунення деградаційних несправностей буде дороговартісною, а з іншого боку, майже неможливою для фотоелектричних систем, що використовуються в автономних об'єктах, особливо таких як супутники. Отже, розробка вбудованої системи виявлення деградаційних несправностей у фотоелектричній системі, яка може динамічно виявляти і обходити деградаційні несправності фотоелектричних елементів для автономних об'єктів, особливо таких як космічні пристрої, є актуальним завданням.

Система виявлення та усунення деградаційних несправностей підходить для продовження терміну служби фотоелектричної системи. Її завданням буде виявлення деградованих фотоелектричних елементів у фотоелектричному

модулі, а по-друге, усунення деградованих елементів шляхом створення нової структури фотоелектричного модуля, що зменшить втрати вихідної потужності, спричинені несправностями фотоелектричних елементів. Розглянемо фотоелектричне джерело живлення автономного пристрою (наносупутника розміром 3U), як показано на рис. 3.4

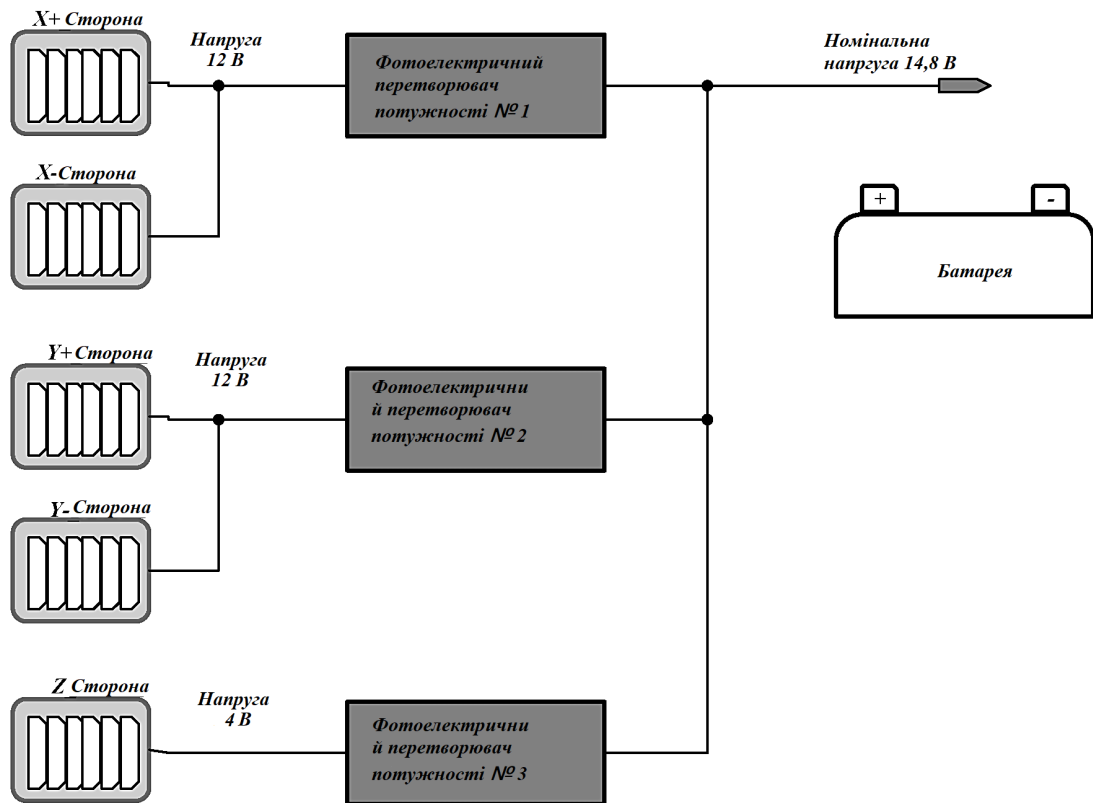


Рисунок 3.4 - Система живлення наносупутника

Фотоелектричні модулі цієї системи живлення можуть бути з'єднані у вигляді матриці розміром N на M , причому елемент цієї матриці буде представляти кожен фотоелектричний комірку під час нормального режиму роботи фотоелектричної системи живлення. Крім того, виявлення деградації вимагатиме формування фотоелектричного модуля, кратного M , в якому значення кратності повинно бути меншим або рівним N ; з використанням наданих фотоелектричних елементів, в той час як об'єднана вихідна потужність буде вимірюватися для визначення наявності або відсутності деградованого фотоелектричного елемента в фотоелектричному модулі. За наявності деградованих фотоелементів, після успішного усунення несправностей системи

буде сформовано новий фотоелектричний модуль за час N_{opt} та M_{opt} , що відповідає вимогам системи усунення несправностей. Таким чином, вихідна потужність системи збільшиться. У випадку, коли деградовані фотоелектричні елементи були видалені зі первинного фотоелектричного модуля, ми отримуємо новий сформований фотоелектричний модуль, відомий як матриця (N_{opt}, M_{opt}) , менша за вихідну матрицю (N, M) первинного фотоелектричного модуля, сформованого лише зі здоровими фотоелектричними елементами. Режим матричної конфігурації фотоелектричного модуля може бути виконаний за допомогою малопотужних електронних перемикачів, як показано на рис. 3.5, де всі шість сонячних елементів з боку X^+ з'єднані таким чином, щоб вони могли сформувати матрицю $M(6,1)$.

Виходячи з рис.3.5, можна отримати додаткову інформацію щодо схеми перемикання всіх цих малопотужних електронних вимикачів під час виявлення та усунення деградаційних несправностей, просто перевіривши їх у режим увімкненого або вимкненого стану. Тому запропонований алгоритм виявлення деградаційних несправностей буде виконуватися з використанням взаємозв'язку, показаного на попередньому рисунку. Ідентифікація деградованого фотоелектричного елемента з логарифмічною часовою характеристикою буде основним завданням алгоритму виявлення деградаційних несправностей. З іншого боку, визначення оптимальної схеми з'єднання фотоелектричного модуля буде виділеним завданням алгоритму усунення несправностей. Одноразове виконання алгоритму виявлення деградаційних несправностей буде відбуватися через фіксований інтервал часу, відомий як Δt . Важливо розуміти, що цей інтервал часу повинен бути меншим, ніж середній інтервал часу для виникнення деградаційної несправності.

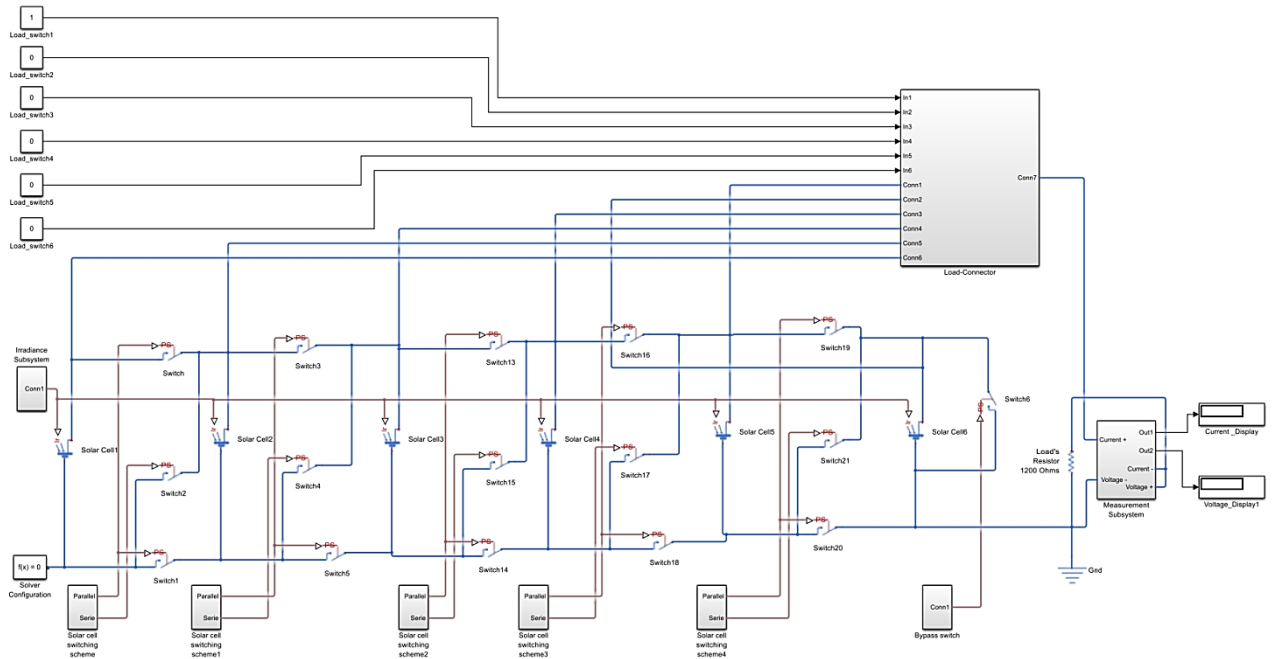


Рисунок 3.5 - З'єднання на стороні X^+ , що використовується для виявлення та усунення деградаційних пошкоджень

Спочатку алгоритм виявлення деградаційних несправностей буде порівнювати фактичну вихідну потужність фотоелектричного елемента з теоретичною вихідною потужністю фотоелектричного елемента, коли немає деградованих фотоелектричних елементів. У разі відхилення між порівнюваними величинами алгоритм виявлення деградаційних несправностей завершиться, якщо деградаційних несправностей не буде виявлено, коли виявлене відхилення буде меншим за попередньо визначену порогову похибку. І навпаки, алгоритм виявлення деградаційних несправностей буде продовжувати працювати, щоб виявити наявність будь-яких деградованих фотоелектричних елементів в системі, і як тільки деградований елемент буде знайдено, алгоритм усунення несправностей перейде до його виконання, виключаючи деградовані фотоелектричні елементи з фотоелектричного модуля. Підтвердження відсутності нового деградованого фотоелемента буде основним завданням алгоритму виявлення деградації. Таким чином, меншими будуть наукові обчислення алгоритмів виявлення деградаційних несправностей та їх усунення. Інтервал часу Δt , через який буде виконуватися алгоритм,

конфігурується відносно тривалості імпульсу наносупутника над виділеною йому наземною станцією, що дозволить також активізувати наземний зв'язок, який наносупутник здійснює з точки зору перегляду або завантаження фактичних параметрів під час проходження своєї наземної станції в космічному середовищі.

Алгоритм перевірки існування деградаційної несправності насправді є найпростішою схемою пошуку несправностей. Ця концепція з'ясовує, чи присутній деградований фотоелектричний елемент в групі з: $a \cdot M_{\text{ф. е.}}$. Максимальна вихідна потужність групи відстежується за допомогою блоку відстеження точки максимальної потужності фотоелектричної системи. Маємо на увазі, що: $a \geq a_{\min}$; Тут зазначено порогове значення: a_{\min} . В результаті виходить величезна вихідна напруга режиму з'єднання $a \cdot M_{\text{ф. е.}}$, так що він може коректно бути драйвером зарядного пристрою. Іншими словами, якщо у нас є фотоелектричний модуль, менший за $a_{\min} \cdot M_{\text{ф. е.}}$, алгоритм перевірки наявності деградаційної несправності не зможе працювати.

В нашому випадку алгоритм виявлення деградаційних несправностей буде виконуватися за допомогою двох інструкцій:

- По-перше, ідентифікація рядка, виділеного для деградованих несправних фотоелектричних елементів.
- По-друге, ідентифікація стовпця, призначеного для деградованих несправних фотоелектричних елементів.

Ці перераховані інструкції будуть використані для виявлення будь-яких деградаційних несправностей в модулі конфігурації фотоелектричних елементів $N \cdot M_{\text{ф. е.}}$. За цих обставин виконується первинний запуск алгоритму перевірки наявності деградаційних несправностей на всьому фотоелектричному модулі. Якщо деградованих несправних елементів не виявлено, алгоритм виявлення деградаційних несправностей зупиняється. В іншому випадку алгоритм перейде до наступного етапу видалення всіх деградованих несправних фотоелементів, і процес усунення несправностей знову з'єднає решту здорових фотоелементів, щоб зменшити втрати потужності, що генеруються деградованими

фотоелементами в системі. Алгоритм виявлення деградації фотоелектричного модуля, що складається з шести фотоелектричних елементів, був розрахований за допомогою MATLAB для аналізу стану деградації кожного окремого елемента, використовуючи контрольоване значення струму короткого замикання та параметрів напруги відкритого замикання. Враховуючи, що шість фотоелектричних елементів на одній грані наносупутника Zascube 2 можуть бути сконфігуровані так, як показано на рис. 3.6, під час останніх вимірювань струму короткого замикання і напруги розімкнутого стану.

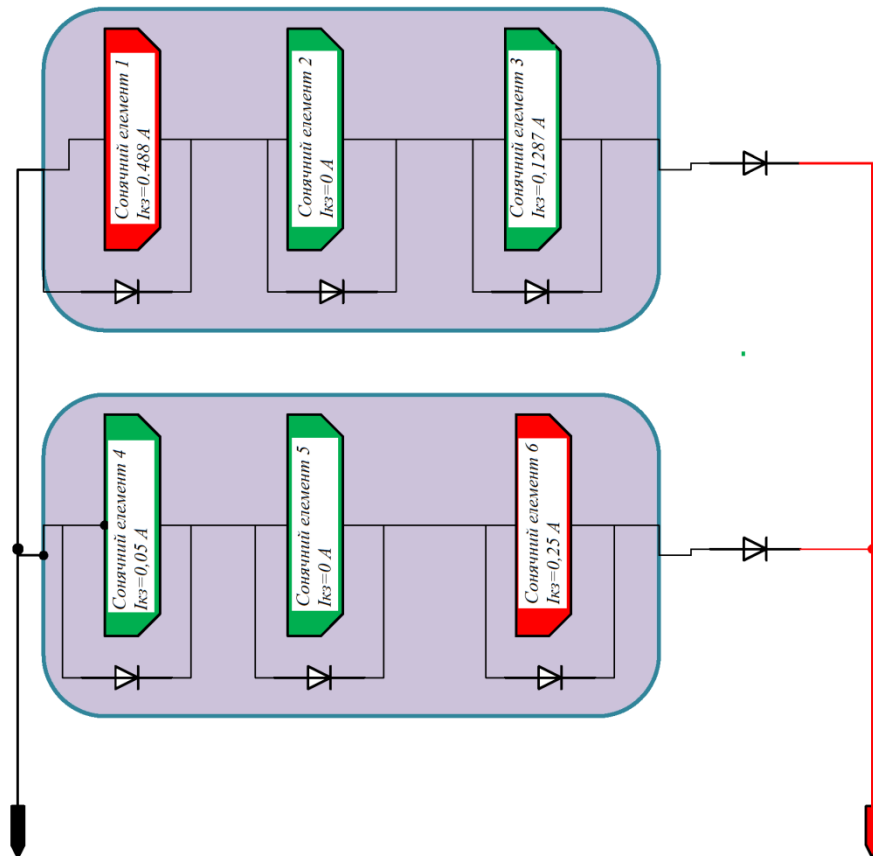


Рисунок 3.6 - Результати моніторингу струму короткого замикання на стороні X+ наносупутника Zascube 2

З рис. 3.6 чітко можна бачимо, що маємо два деградовані фотоелементи, показані червоним кольором, де струм короткого замикання перевищує п'ятдесят відсотків від стандартного значення струму короткого замикання для

сонячного елемента XTJ-Prime. Використовуючи концепцію матриці даних, згадану раніше, виміряні параметри кожного фотоелектричного елемента будуть зберігатися в матриці фотоелектричних елементів $N \cdot M$, як показано у (3.6)

$$Matrix\ N,M = \begin{bmatrix} 1^{row}, 1^{column} & \dots & 1^{row}, M^{column} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ N^{row}, 1^{column} & \dots & N^{row}, M^{column} \end{bmatrix} \quad (3.6)$$

На основі схеми взаємозв'язку, показаного на рис. 3.8, зібрані дані можна зберігати у вигляді матриці за допомогою Matlab, як показано у (3.7).

$$Matrix\ 2,3 = \begin{bmatrix} solar\ cell1 & solar\ cell2 & solar\ cell3 \\ solar\ cell4 & solar\ cell5 & solar\ cell6 \end{bmatrix} \quad (3.7)$$

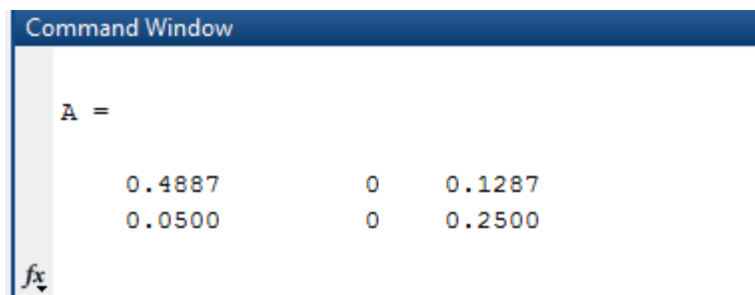


Рисунок 3.7 - Знімок командного вікна Matlab після фіксації виміряного струму короткого замикання кожного фотоелемента

Після ідентифікації номера рядка та номера стовпця деградованого несправного фотоелектричного елемента алгоритм виявлення деградації в Matlab повинен повідомити оператору або групі з усунення несправностей відповідні координати розташування деградованих елементів, щоб їх можна було виключити з решти здорових фотоелектричних модулів. Це описано у (3.8):

$$\begin{aligned}
 &\text{Кількість паралельно з'єднаних стрінгів} = 2 \\
 &\text{Кількість послідовно з'єднаних елементів} = 3 \\
 &Matrix_{2,3} = (0.4887 \ 0.05 \ 0 \ 0 \ 0.1287 \ 0.25) \\
 &Matrix_{2,3_Digital} = (0 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 0)
 \end{aligned} \tag{3.8}$$

Після перегрупування зібраних даних вимірювання струму одиночного або індивідуального короткого замикання фотоелектричних елементів в єдиний масив фотоелектричних елементів за допомогою Matlab, алгоритм може легко проаналізувати зібрану інформацію та ідентифікувати деградовані фотоелектричні елементи. Нижче наведено результат пошуку алгоритму виявлення деградаційних несправностей для обраної конфігурації матриці (2, 3), складеної із взаємозв'язку, заданого результатом:

$$\text{Положення несправного сонячного елемента} = (1 \ 6) \tag{3.9}$$

Як вже згадувалось раніше, як тільки деградовані фотоелектричні елементи були ідентифіковані, алгоритм усунення несправностей повинен взяти на себе завдання виключити деградовані фотоелектричні елементи зі здорових фотоелектричних елементів, щоб ми могли зменшити втрати потужності, спричинені цими деградованими несправними фотоелектричними елементами. Таким чином, новостворена конфігурація буде зроблена з використанням лише здорових сонячних елементів, що залишилися (3.10).

$$\text{Дані про здорові сонячні елементи} = 1 \ 1 \ 1 \ 1 \tag{3.10}$$

Використовуючи здорові фотоелементи, що залишилися, можемо прийняти рішення про їх повторне з'єднання у відповідний спосіб, щоб забезпечити необхідну потужність підключеного навантаження з вищою ефективністю. У формулах (3.10 – (3.13) показані можливі комбінації, які можна створити з представленого сценарію, коли на одній грані Zscube 2 в просторі знаходяться 4 справних фотоелектричних елементи.

$$\text{Reconfigurable_Serie_Parallel} = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.11)$$

$$\text{Reconfigurable_Serie} = \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (3.12)$$

$$\text{Reconfigurable_Parallel} = 1 \ 1 \ 1 \ 1 \quad (3.13)$$

Індекси здорових фотоелектричних елементів повинні бути надіслані до Simulink-моделі шести фотоелектричних елементів, яка використовується для перевірки результатів і висновків в даному проєкті. Крім того, шунтуючі діоди, що використовуються в стандартній конфігурації, замінені на силові транзистори з низьким логічним рівнем, що дозволить з'єднати ці фотоелектричні елементи з одного блоку в інший. Ілюстрація послідовного з'єднання шести сонячних елементів XTJ-Prime за допомогою MOSFET транзисторів показана на рис. 3.8, 3.9.

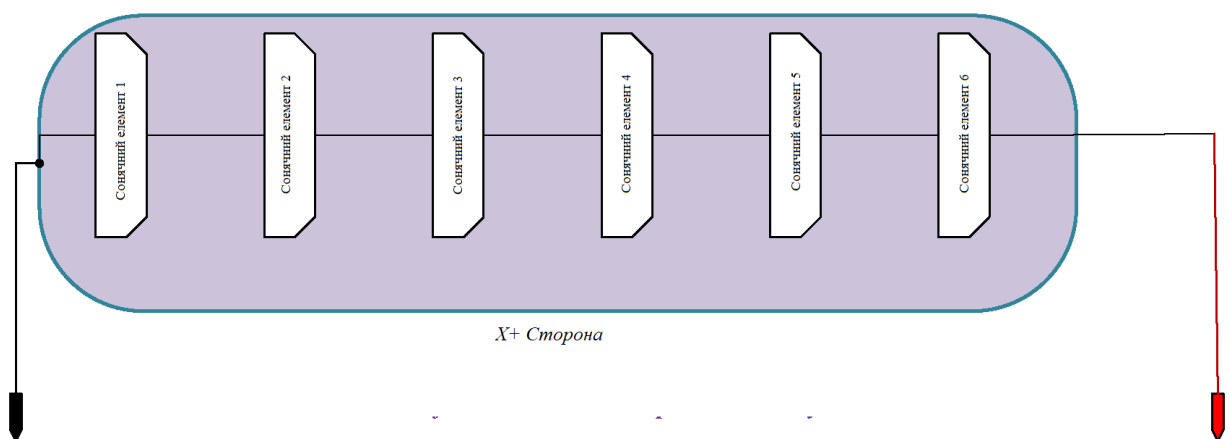


Рисунок 3.8 - Шість сонячних елементів (XTJ-Prime), з'єднаних послідовно за допомогою простих проводів

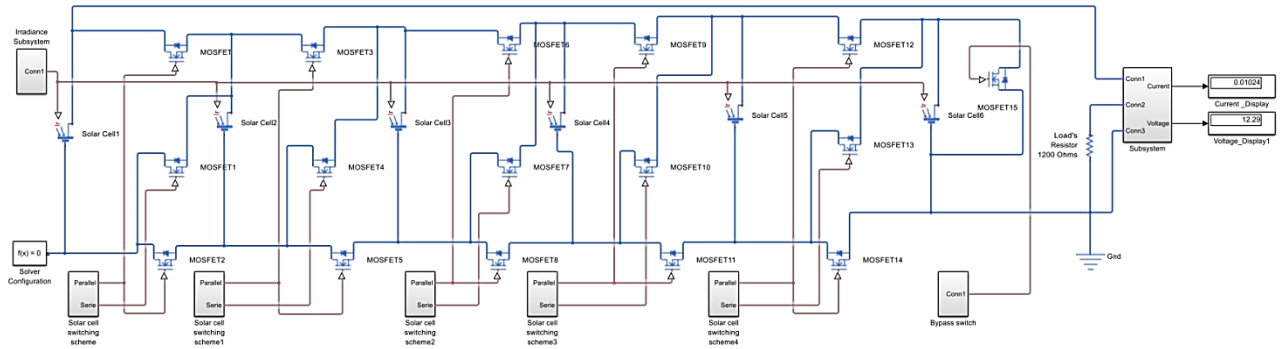


Рисунок 3.9 - Шість сонячних елементів (XTJ-Prime), з'єднаних послідовно за допомогою MOSFET транзисторів

Оптимальна схема з'єднання фотоелектричного модуля буде відпрацьований в процесі роботи алгоритму усунення несправностей. Отже, втрати вихідної потужності, що генеруються несправними деградованими фотоелектричними елементами фотоелектричного модуля, будуть зменшені. Завдяки результатам роботи алгоритму виявлення деградаційних несправностей буде відома кількість справних фотоелектричних елементів. Відповідно, потрібно буде прийняти рішення щодо оптимальної схеми з'єднання фотоелектричних модулів, щоб потреба у електроенергії могла бути задоволена відповідною фотоелектричною системою. Враховуючи, що кількість недеградованих і активних фотоелектричних елементів представлена через: S , тоді функція цих фотоелектричних елементів, що не деградували, матиме вигляд: (S) . Враховуючи загальну конфігурацію фотоелектричного модуля з $N \cdot M$ фотоелементів, де кількість несправних деградованих фотоелементів задається змінною з ім'ям: $faulty$. За цієї обставини максимум недеградованих активних фотоелектричних елементів даного фотоелектричного модуля буде виражатися через (3.14).

$$S_{\max imum} = N \cdot M - faulty \quad (3.14)$$

Спочатку буде визначено набір запропонованих значень S у висхідній класифікації, щоб рівняння, наведене нижче, було істинним (3.15)

$$[S + F S] \geq [S_{\max imum} + F S_{\max imum}] \quad (3.15)$$

Таким чином, кількість можливих схем з'єднань фотоелектричного модуля з такою кількістю S недеградованих активних фотоелектричних елементів буде дорівнює $F(S)$. Використовуючи ці можливі схеми з'єднань, необхідно знайти оптимальну конфігурацію, яка забезпечить максимальну вихідну потужність $P_{\max}(S)$ решти фотоелектричного модуля після виключення несправних деградованих фотоелементів.

3.5 Удосконалений реконфігурований фотоелектричний модуль

3.5.1 Моделювання та імітація реконфігурованого модуля

В результаті аналізу алгоритму виявлення деградованих комірок запропоновано удосконалену схему реконфігурованого фотоелектричного модуля, який дозволить виключити несправні деградовані фотоелектричні елементи з фотоелектричного масиву, як показано на рис. 3.10:

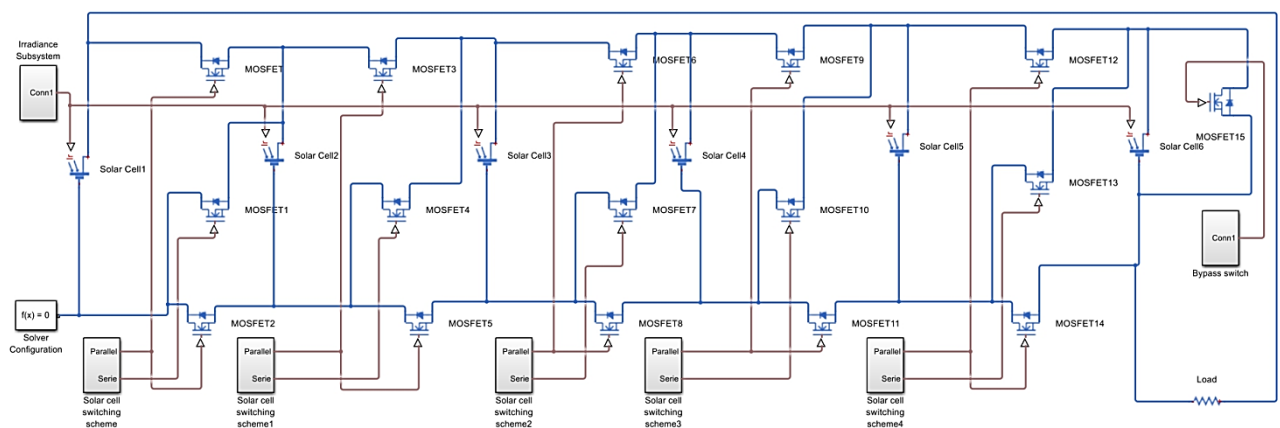


Рисунок 3.10 - Архітектура реконфігурованого фотоелектричного модуля

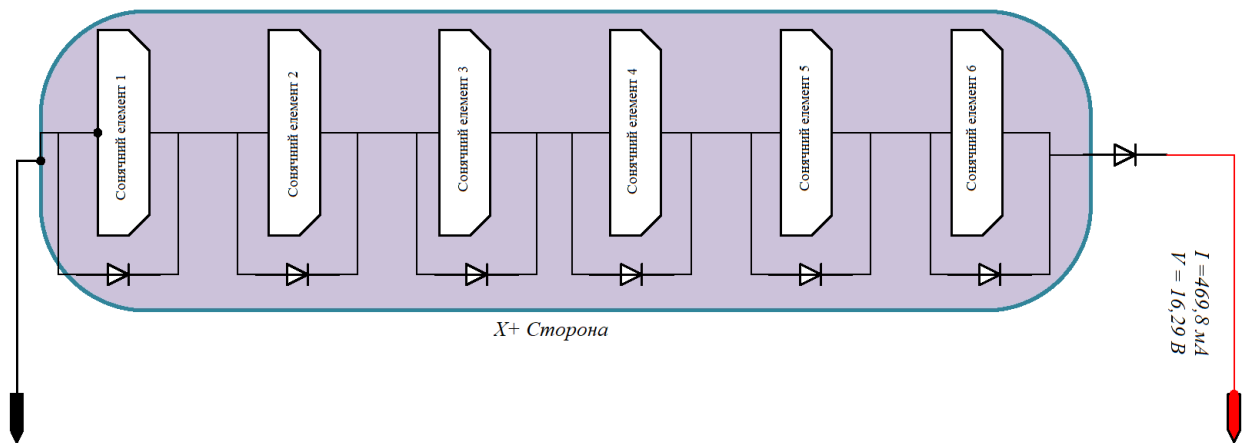
X⁺ Face з використанням Simulink

Розглядаючи одну грань генератора фотоелектричної системи Zascube 2, можемо чітко помітити, що отримали послідовне з'єднання шести фотоелектричних елементів XTJ-Prime. На основі удосконаленої схеми

з'єднань, фотоелектричні елементи Zscube 2 можуть бути змодельовані за допомогою Simulink, як показано на рис. 3.10. Використовуючи дану модель Simulink, можна контролювати електричні параметри фотоелектричного модуля, такі як

- Вольт-амперна характеристика (I-V характеристика)
- Вольт-ватна характеристика (P-V характеристика)

Реалізована версія цієї Simulink-моделі, яка дозволяє здійснювати моніторинг зазначених характеристик, наведена на рис.3.11.



Багатоперехідний сонячний елемент XTJ_Prime з ККД 30.7%.

$$V_{PK} = 2.715 \text{ В}$$

$$V_{mp} = 2.39 \text{ В}$$

$$I_{mp} = 469.8 \text{ мА}$$

$$I_{K3} = 488.7 \text{ мА}$$

$$P_{total} = I_{total} \cdot V_{total} = 7.653042 \text{ Вт}$$

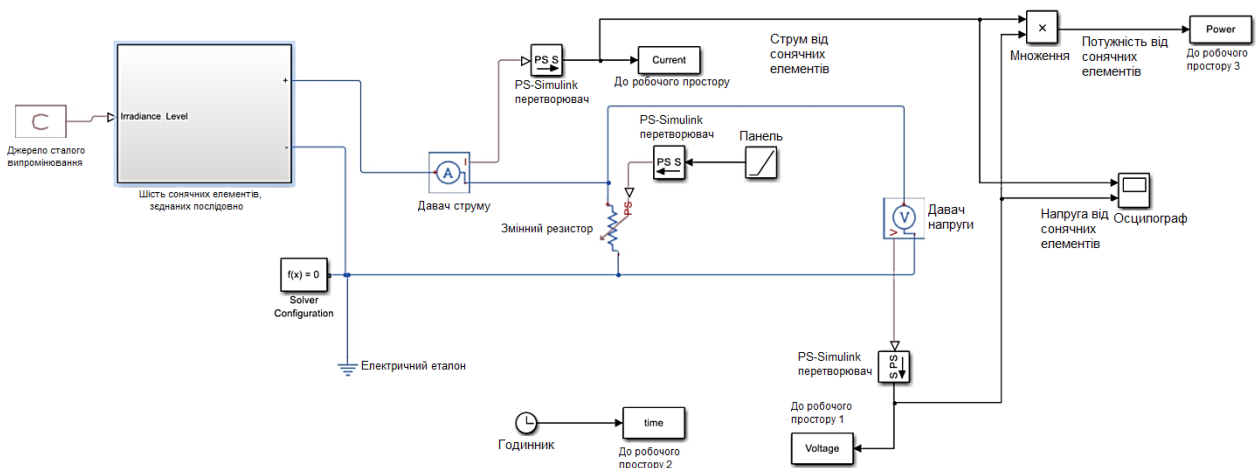
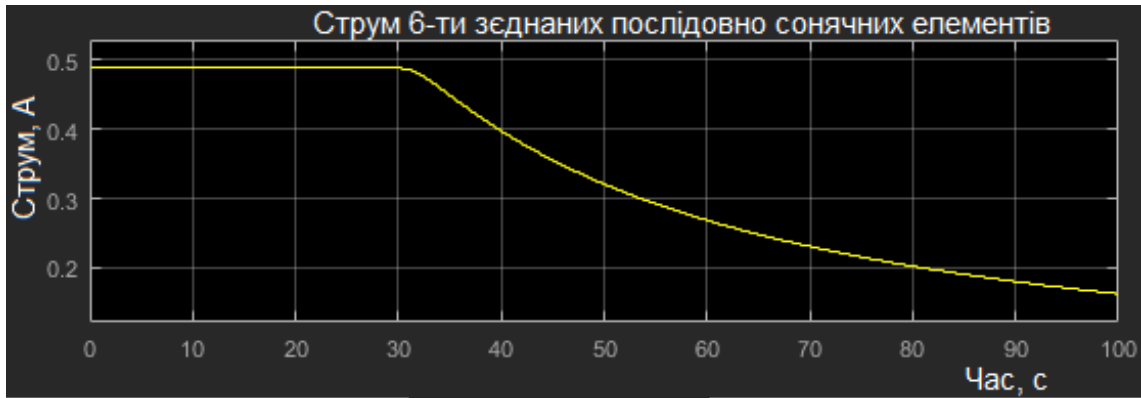
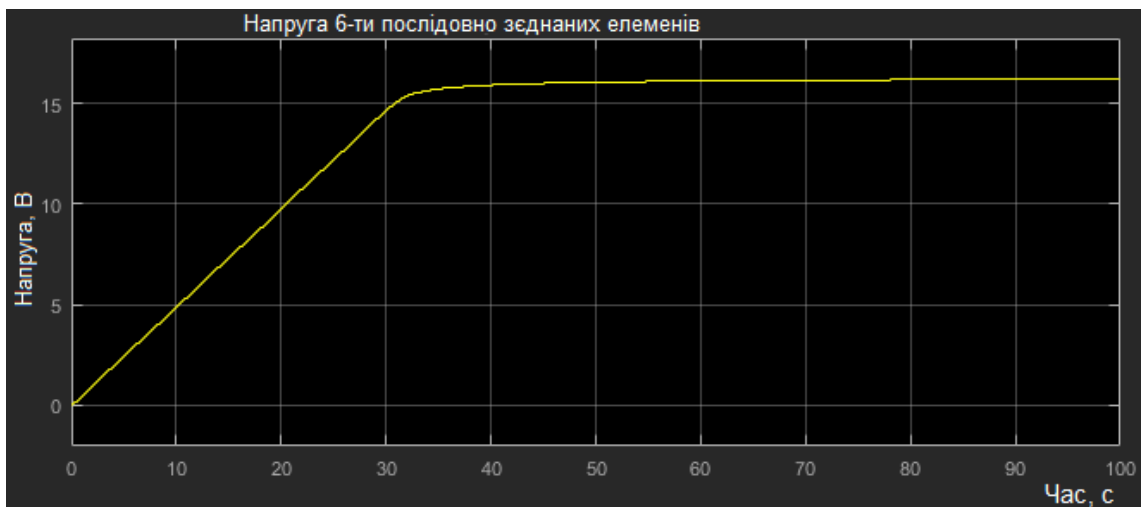


Рисунок 3.11 - Simulink-модель «здорового» модуля



а)



б)

Рисунок 3.12 – Струмо-часова (а) і напруго-часова (б) характеристика «здорового» модуля

Практично, на рис.3.13 можна помітити, що як напруга, так і струм короткого замикання комбінації з 6 здорових сонячних елементів ХТJ_Prime не досягають своїх номінальних значень в той момент, коли вони були під впливом сонця. Знадобиться деякий час, щоб обидва параметри досягли очікуваних значень при роботі в стандартних умовах.

З кривих, зображених на рисунку 3.13, можна помітити, що фактичний загальний струм здорового модуля становить менше 0,5 Ампера, приблизно 0,48 Ампера. Тоді як загальна вироблена напруга трохи перевищує 16 Вольт.

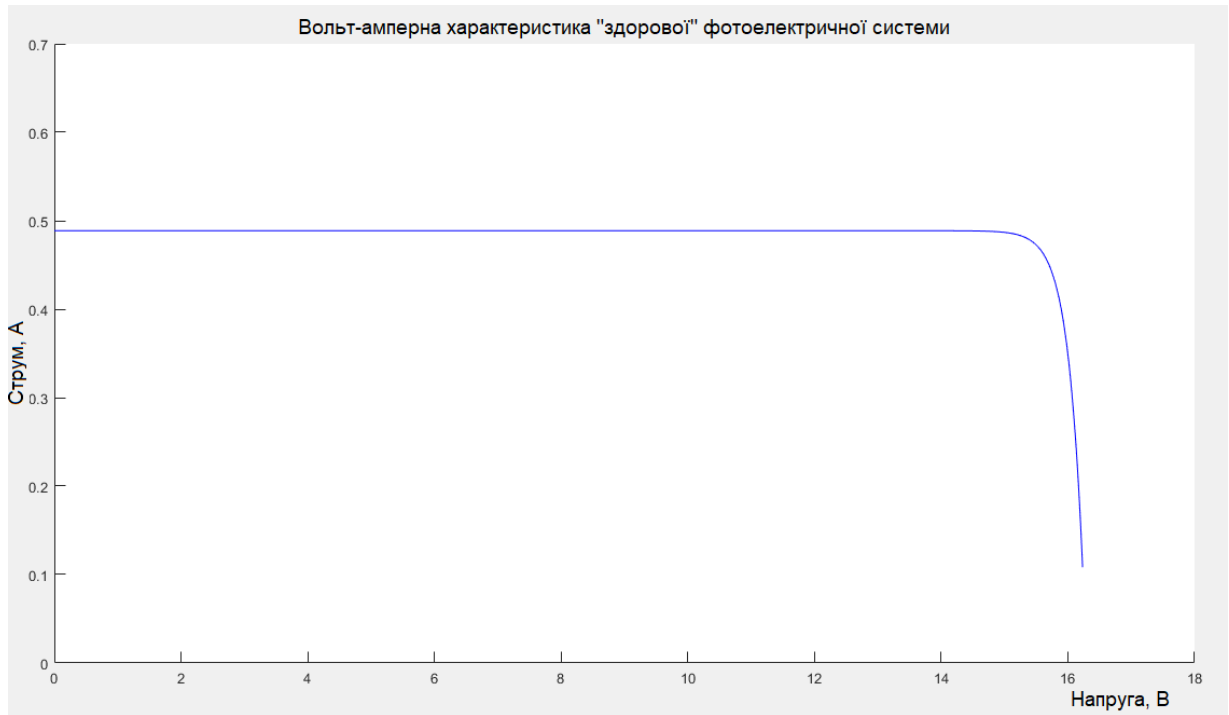


Рисунок 3.13 - Вольт-амперна характеристика (I-V) «здорового» модуля

За допомогою наведеного вище рисунка можна отримати максимальний струм і напругу (рис. 3.14), що допоможе у визначенні максимальної потужності, яка є однією з головних ролей блоку відстеження точки максимальної потужності в енергопостачанні наносупутника.

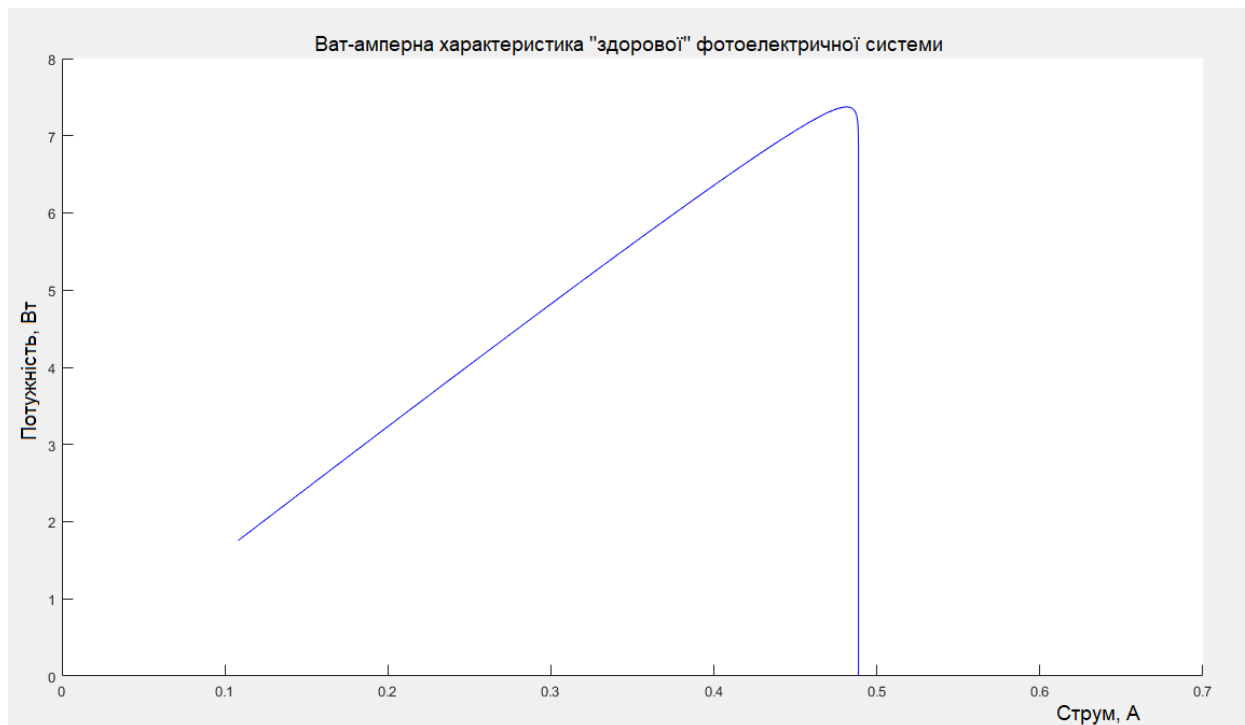


Рисунок 3.14 - Ват-амперна характеристика (P-I) «здорового» модуля

Гнучка реконфігурація з усуненням деградованих несправних елементів, що дозволяє підключати навантаження незалежно від опорної точки напруги, показана на рис. 3.15.

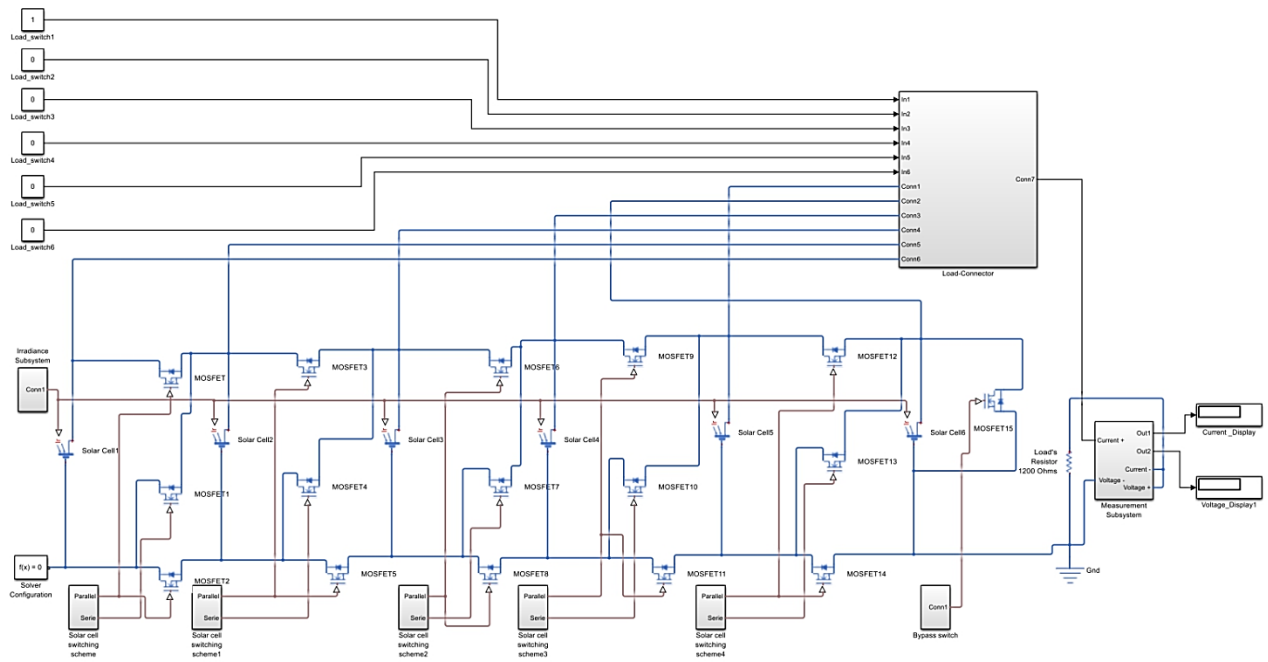


Рисунок 3.15 - Реалізована архітектура реконфігурованого фотоелектричного модуля

3.5.2 Проектування друкованої плати ключів (транзисторів) реконфігурованого модуля

Друкована плата реалізованої вище реконфігурованої схеми з використанням поверхнево закріплених MOSFETs показана на рис. 3.16.

Розмір друкованої плати становить 51 мм на 43 мм. Друкована плата була з використанням як верхнього (рис. 3.17), так і нижнього шару (рис. 3.18), щоб зменшити кількість перемичок, необхідних для реалізації деяких з'єднань.

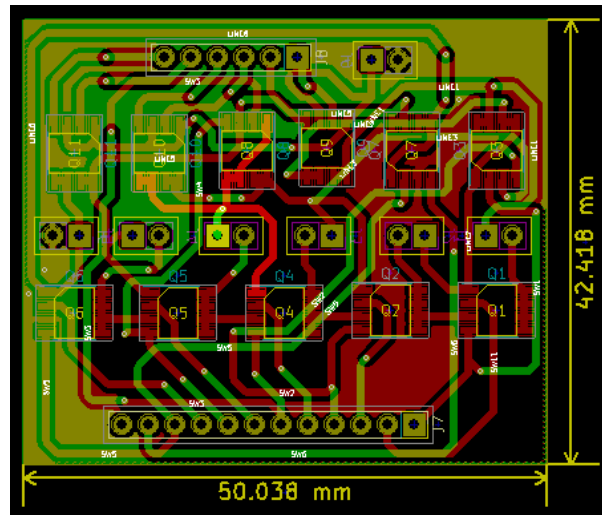


Рисунок 3.16 - Доріжки верхнього та нижнього шарів друкованої плати ключів схеми реконфігурованих фотоелектричних модулів

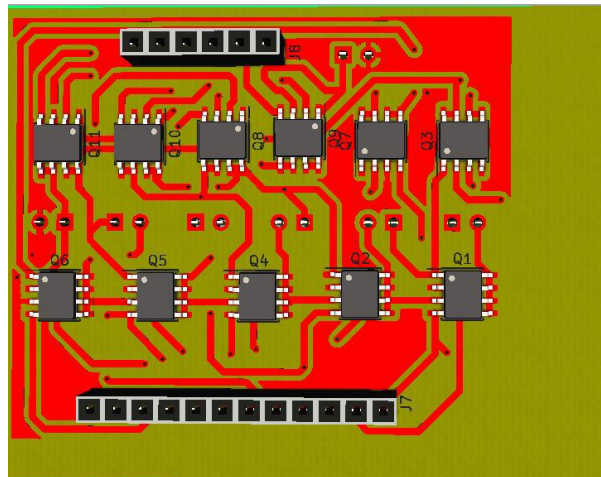


Рисунок 3.17 - Заповнений верхній шар друкованої плати ключів схеми реконфігурованого фотоелектричного модуля

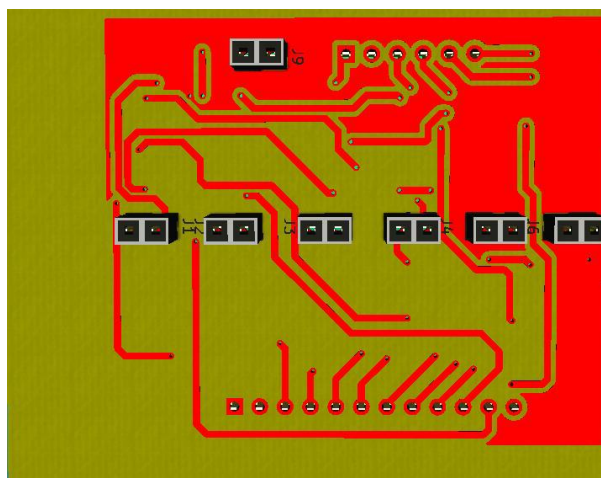


Рисунок 3.18 - Заповнений нижній шар друкованої плати ключів схеми реконфігурованого фотоелектричного модуля

Верхній шар був реалізований з використанням подвійного N-канального силового транзистора FDMA1028NZ поверхневого монтажу. Ці малопотужні транзистори не потребують зовнішніх драйверів.

3.5.3 Блок-схема системи керування

Згідно з блок-схемою, представленою на рисунку 3.19, окремі сонячні елементи будуть контролюватися за допомогою модуля вимірювання струму. По-перше, модуль вимірювання струму матиме можливість вимірювати струм короткого замикання кожного сонячного елемента. По-друге, вимірні параметри будуть зберігатися в пам'яті. Ця операція дозволить порівняти вимірні значення з еталонним значенням струму короткого замикання [15]. Результат порівняння увімкне або вимкне транзистор логічного рівня. Керування увімкненням та вимкненням цих малопотужних транзисторів призводить до реконфігурації всього масиву сонячних елементів.

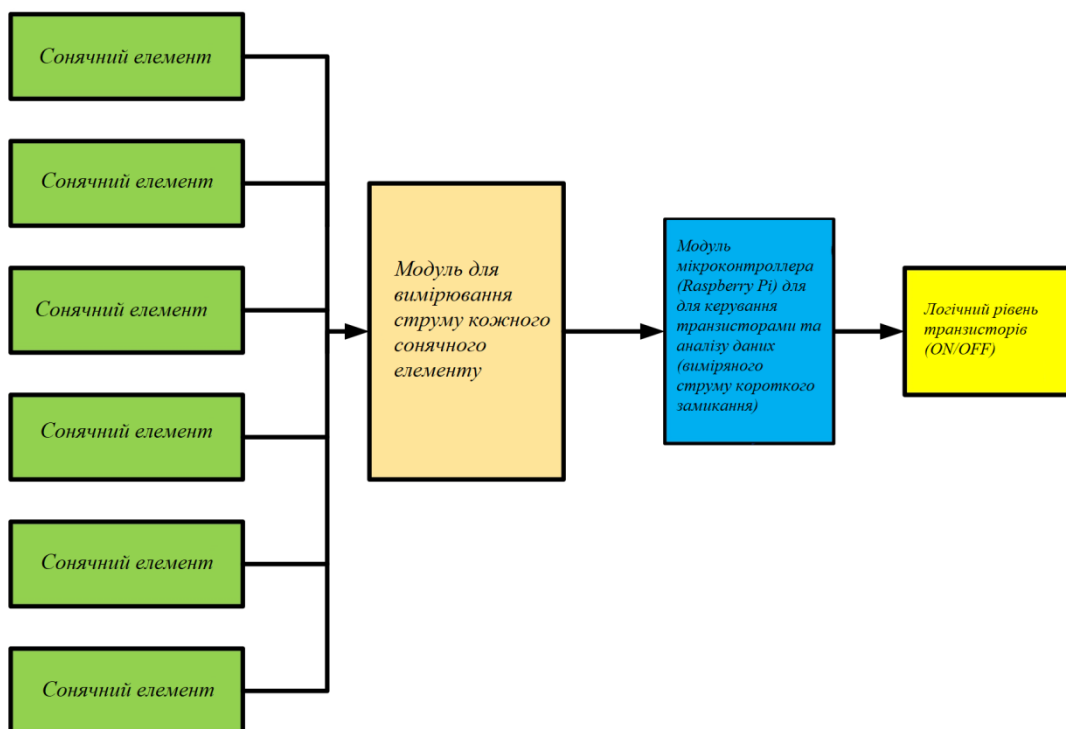


Рисунок 3.19 - Блок-схема системи керування розробленого реконфігурованого фотоелектричного модуля

3.6 Висновки до розділу

1. Детально описано типи фотоелектричної деградації сонячних елементів, серед яких найбільш суттєві: оптична деградація, деградація, викликана світлом, деградація, спричинена температурою.
2. Розроблено Simulink-модель, яка може виконувати розрахунки електричних характеристик фотоелектричного модуля, встановленого на автономному об'єкті (наносупутнику) з використанням сонячних елементів ХТІ з потрійним переходом.
3. Розроблено модуль моніторингу струму короткого замикання для кожного фотоелектричного елемента.
4. Розроблено схему реконфігурованого масиву сонячних елементів, встановлених на модулі автономного об'єкту (наносупутнику), з можливістю виключення деградованих сонячних елементів з фотоелектричного масиву.

4 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ

4.1 Основні вимоги безпеки до улаштування та експлуатації технологічного обладнання

Загальні вимоги безпеки до конструкції виробничого обладнання встановлені ДНАОП [16].

Безпека виробничого обладнання забезпечується:

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

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

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

Матеріали, що застосовуються в конструкції виробничого обладнання, не повинні бути небезпечними і- шкідливими. Складові частини обладнання (в тому числі трубопроводи, проводка, кабелі і т.п.) повинні виконуватися з таким

розрахунком, щоб виключалась можливість їх випадкового пошкодження, що може створити небезпеку. Конструкція обладнання, що має газо-, паро-, пневмо-, гідросистеми та інші, повинна відповідати вимогам безпеки для цих систем [17].

Рухомі частини обладнання, що є джерелом небезпеки, повинні бути огорожені, за виключенням частин, огороження яких не допускається за їх функціональним призначенням. У цих випадках передбачається сигналізація, що попереджує про пуск машин в роботу, засоби зупинки і відключення джерел енергії. При наявності машин значної довжини (наприклад, транспортерів) засоби зупинки повинні розміщуватись не рідше як через кожні 10 м їх довжини.

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

Конструкцією виробничого обладнання повинна передбачатись сигналізація, а у разі потреби і засоби автоматичної зупинки і відключення обладнання від джерел енергії при небезпечних несправностях, аваріях і при режимах роботи, близьких до небезпечних. В необхідних випадках виробниче обладнання повинно мати засоби гальмування, ефективність дії яких має бути достатня для забезпечення безпеки і відповідати вимогам стандартів на вироби. Спрацьовування термінової зупинки не повинно створювати небезпеки для працюючих або аварійної ситуації.

Обладнання, яке в процесі роботи виділяє виробничі шкідливості (пил, дим, пару, газ, вологу) в навколишнє середовище, повинно бути герметизоване і забезпечене аспіраційними вентиляційними установками.

4.2 Сигнально-попереджувальні пристрої і фарбування обладнання

Для попередження про небезпеку застосовують звукові, світлові і кольорові сигнали. Сигнальні пристрої встановлюються в зонах видимості і слухового відчуття обслуговуючого персоналу. Сигнали небезпеки повинні чітко сприйматися у виробничій обстановці [16].

Нормативами визначаються сигнальні і розпізнавальні кольори. Основними сигнальними кольорами є червоний - забороняючий, засвідчуючий про безпосередню небезпеку, жовтий - зосереджуючий увагу і попереджуючий про можливу небезпеку і зелений - означаючий безпеку.

Розпізнавальними кольорами вважають зелений, червоний, синій, жовтий оранжевий, фіолетовий, коричневий, сірий.

Розпізнавальні кольори наносять на технологічне підйом-но-транспортне обладнання, трубопроводи, елементи будівельних конструкцій та інші споруди.

Сигнально-попереджувальним фарбуванням (жовтими і чорними смугами) відмічаються елементи будівельних конструкцій і міжцехового транспорту. Так, жовто-чорною смугою позначаються низькі балки, виступи і перепади у площині підлоги, краю люків і колодязів, кабіни і перила кранів, вантажні гаки, бічні поверхні електрокарів, навантажувачів, візків, стріл автокранів.

Огородження небезпечних зон із зовнішнього боку фарбують в жовтий колір, із внутрішнього - в червоний.

Габарити проїздів, проходи і робочі місця на підлозі виробничих приміщень позначаються смугою чи штриховими лініями білого чи жовтого кольору.

Розпізнавальне фарбування однойменних струмоведучих шин у кожній електроустановці приймається однаковим.

При змінному струмі фаза А фарбується в жовтий колір, фаза В - зелений, фаза С - червоний, нульова (при ізолюваній чи заземленій нейтралі) - в чорний; при однофазному струмі провідник, під'єднаний до початку обмотки джерела

живлення, - в жовтий, до кінця обмотки - в червоний; при постійному струмі позитивна фаза "+" - в червоний, негативна "-" – в синій, нейтральна - в білий.

Стандартами передбачена система знаків безпеки, які повинні використовуватися не тільки в промисловості, але й в інших галузях народного господарства, а також передбачені знаки, які є загальними для багатьох виробництв і професій, але у разі необхідності вони можуть бути конкретизовані із використанням графічних зображень і надписів, що застосовуються в інших стандартах.

4.3 Особливості проведення рятувальних та інших невідкладних робіт при ліквідації наслідків великих виробничих аварій і катастроф

Великі виробничі аварії і катастрофи (далі — аварії) можуть призвести до загибелі людей і завдати відчутної шкоди народному господарству [17,18]. Тому забезпечення безаварійної роботи на підприємстві слід розглядати як важливу державну справу, що вимагає повсякденної уваги міністерств, відомств, керівників та інженерно-технічного персоналу ОГ. Аварії можуть відбутися на будь-яких промислових підприємствах і на транспорті, однак найбільшу небезпеку становлять об'єкти, які виробляють чи застосовують у технології СДОР, вибухо- і пожежонебезпечні матеріали й продукти. Небезпечними об'єктами є також склади, бази, залізничні станції і порти, де зберігаються чи знаходяться запаси цих матеріалів і продуктів.

Аварії можуть відбутися в результаті стихійних лих, допущених прорахунків у проектуванні, будівництві й устаткуванні підприємств; введення в експлуатацію промислових об'єктів з великими недоробками і відступами від проектів; прийняття в експлуатацію вентиляційних систем без випробування їх на ефективність роботи; незабезпечення вибухо- і пожежонебезпечних виробництв необхідною промисловою вентиляцією і захистом від пилу; недоробок з техніки безпеки й охорони праці; незадовільного оснащення контрольно-вимірною, захисною, блокуючою апаратурою і недостатньої

герметичності технологічного устаткування. Вони можуть бути також наслідком порушення технологічних процесів, несправності електропроводки і відсутності надійних систем пожежогасіння.

Основними заходами щодо ліквідації наслідків великих аварій є: оповіщення про небезпеку робітників та службовців, формувань ЦО і населення, що проживає поблизу об'єкта; комплексна розвідка об'єкта, на якому відбулася аварія; порятунок людей з-під завалів, зі зруйнованих і пошкоджених будинків та споруд, надання медичної допомоги постраждалим і евакуація їх у лікувальні установи; гасіння пожеж; локалізація аварій на комунально-енергетичних мережах, які перешкоджають веденню рятувальних робіт; улаштування проїздів і проходів до місць аварій; обвалування нестійких конструкцій, розбирання завалів, демонтаж збереженого устаткування, якому загрожує небезпека; організація комендантської служби.

Рятувальні роботи в місцях аварії, як правило, проводяться в умовах загазованості, а при пожежах — задимленості і високих температур; щоб забезпечити безперервність роботи з наростаючим темпом, сили ЦО поділяють на зміни і виділяють резерви.

У залежності від характеру і масштабу аварії керівництво ліквідацією наслідків здійснює або керівник даного підприємства, який є одночасно і начальником ЦО, або голова спеціально створюваної надзвичайної комісії. На кожен ділянку призначається керівник з числа відповідальних посадових осіб об'єкта або керівників ЦО і фахівців служб ЦО. Він повинен поставити завдання формуванням, вказати терміни і способи їх виконання, визначити порядок матеріального, технічного й інших видів забезпечення, організувати роботи, своєчасну зміну, відпочинок і харчування особового складу.

Рятувальні роботи і допомога потерпілим організуються негайно після виникнення аварії. Також відразу вживаються заходи до локалізації і гасіння пожеж, без цього неможливе виконання інших робіт. Ухваленню рішення на проведення РІНР передують ретельна розвідка. Основні її завдання — виявити обстановку, що склалася, визначити характер руйнувань і обсяг невідкладних

робіт, умови, у яких потрібно вести ці роботи. У ході розвідки визначаються місцезнаходження постраждалих людей, намічаються способи їх порятунку і шляхи евакуації. Розвідку організовує керівник — начальник ЦО об'єкта (або голова надзвичайної комісії) за допомогою розвідувальних формувань і при обов'язковій участі провідних спеціалістів.

До місця виробничої аварії першими повинні прибувати протипожежні команди, підрозділи міліції, машини швидкої медичної допомоги.

Перша медична і лікарська допомога надається постраждалим, які знаходяться в стані шоку, а також звільненим з-під невеликих завалів і уламків. Витягування людей з-під великих завалів здійснюється з дотриманням заходів безпеки, їм надається невідкладна медична допомога з наступною евакуацією в лікувальні установи.

Будь-яке підприємство має свої особливості, які можуть бути невідомі рятувальникам, але повинні бути враховані. Тому перед початком робіт з кожним формуванням відповідними фахівцями підприємств і служб ЦО проводиться інструктаж, на якому вказуються способи дій при виконанні поставленого завдання і правила безпеки, дотримання яких обов'язково.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

1. Проведено аналіз різних типів сонячних елементів, їх ефективності та перспективи підвищення ККД.
2. Проведено аналіз ефективності перетворення випромінювання сонячним елементом у електричний струм. Описано математичну модель, яка відображає поведінку сонячного елемента при попаданні на нього випромінювання.
3. Проведено аналіз методів визначення деградованих сонячних елементів. Визначено їх переваги та недоліки. В результаті проведених досліджень встановлено негативну особливість байпасних і послідовних діодів, що використовуються у фотоелектричній системі.
4. Проаналізовано схеми з'єднання сонячних елементів без діодів за трьома способами: схема з'єднання з повним перехресним зв'язком; схема з'єднання з мостовим зв'язком; гібридна схема з'єднання.
5. Розроблено Simulink-модель, яка може виконувати розрахунки електричних характеристик сонячного модуля, встановленого на автономному пристрої з використанням сонячних елементів ХТІ з потрійним переходом.
6. Розроблено модуль моніторингу струму короткого замикання для кожного сонячного елемента.
7. Розроблено схему реконфігурованого масиву сонячних елементів, встановлених на модулі автономного пристрою, з можливістю виключення деградованих сонячних елементів з фотоелектричного масиву.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Ковальчук В.О. Шляхи підвищення енергоефективності фотоелектричних систем // Д. П. Драпалюк; А. В. Коваль; В. О. Ковальчук; М. В. Королевич / Актуальні задачі сучасних технологій : зб. тез доповідей XII міжнар. наук.-практ. конф. Молодих учених та студентів, (Тернопіль, 6-7 грудня 2023) / М-во освіти і науки України, Терн. націон. техн. ун-т ім. І. Пулюя [та ін.]. – Тернопіль: ФОП Паляниця В. А., 2023. – С. 165.
2. Vadym Koval, Bogdan Orobchuk, Nataliia Kuzemko, Gao Lijin. Measuring device for photovoltaic modules electrical characteristics testing // Proceedings of the International Conference „Advanced applied energy and information technologies 2021”, 2021.
3. Коваль В. П. Автоматизована вимірювальна установка для дослідження електричних характеристик фотоелектричних модулів/ В. П. Коваль, Б.Я. Оробчук, Л.М. Костик, Я.М.Осадца// Вісник Хмельницького національного університету. – 2022. – № 5. – С. 168-173
4. Kumar, P. (2016). Organic solar cells: device physics, processing, degradation, and prevention. CRC press.
5. Solanki, C. S. (2015). Solar photovoltaics: fundamentals, technologies and applications. Phi learning pvt. Ltd..
6. Коваль В. П. Енергетична ефективність систем позиціонування плоских сонячних панелей / В. П. Коваль, Р. Р. Івасечко, К. М. Козак // Енергозбереження. Енергетика. Енергоаудит. – 2015. – № 3. – С. 2-10
7. Bohdan Orobchuk, Ivan Sysak, Oleh Buniak, Serhii Babiuk, Vadym Koval (2023) Development of the reactive power compensation laboratory bench and its integration into the training simulator of dispatch control system. The 3rd International Workshop on Information Technologies: Theoretical and Applied Problems 2023 (ITTAР 2023).
8. Khaligh, A., & Onar, O. C. (2017). Energy harvesting: solar, wind, and ocean energy conversion systems. CRC press.
9. Messenger, S. R., Summers, G. P., Burke, E. A., Walters, R. J., & Xapsos,

M. A. (2001). Modeling solar cell degradation in space: A comparison of the NRL displacement damage dose and the JPL equivalent fluence approaches. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 9(2), 103-121.

10. Patel, M. R. (2004). *Spacecraft power systems*. CRC press.

11. Vadym Koval, Serhii Martsenko, Myroslav Zin (2023). Designing and Implementing Intelligent Lighting Control System. The 1st International Workshop on Computer Information Technologies in Industry 4.0 (CITI 2023). Ternopil, Ukraine, June 14-16, Vol. 3468, Pages 241-249.

12. Meyer, E. L., & Van Dyk, E. E. (2004). Assessing the reliability and degradation of photovoltaic module performance parameters. *IEEE Transactions on reliability*, 53(1), 83-92.

13. Керея Ю.Б. Роль системи накопичення енергії у електроенергетичній системі //Ю.Б.Керея, В.П.Коваль /Актуальні задачі сучасних технологій : зб. тез доповідей XI міжнар. наук.-практ. конф. Молодих учених та студентів, (Тернопіль, 7–8 груд. 2022.) / М-во освіти і науки України, Терн. націон.техн. ун-т ім. І. Пулюя [та ін.]. – Тернопіль: ФОП Паляниця В. А., 2022. – С. 68.

14. Lin, X., Wang, Y., Pedram, M., Kim, J., & Chang, N. (2013). Designing fault-tolerant photovoltaic systems. *IEEE Design & Test*, 31(3), 76-84.

15. Bohdan Orobchuk, Ivan Sysak, Oleh Buniak, Serhii Babiuk, Vadym Koval (2023) Development of the reactive power compensation laboratory bench and its integration into the training simulator of dispatch control system. The 3rd International Workshop on Information Technologies: Theoretical and Applied Problems 2023 (ITAP 2023)

16. Жидецький В.Ц. Основи охорони праці. Підручник/ В.Ц.Жидецький, В.С Джигирей, О.В.Мельников. – Вид. 5-те, доповнене. – Львів: Афіша, 2000. – 350 с.

17. Стеблюк М.І. Цивільна оборона та цивільний захист: Підручник. – 2-ге вид., перероб. Затверджено МОН / М.І. Стеблюк.– К., 2010. – 487 с

18. Техноекологія та цивільна безпека. Частина «цивільна безпека»/ автор-укладач В.С. Стручок– Тернопіль: ФОП Паляниця В. А., – 156 с.