

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ**  
**Чорноморський національний університет імені Петра Могили**  
**Факультет комп'ютерних наук**  
**Кафедра комп'ютерної інженерії**

ДОПУЩЕНО ДО ЗАХИСТУ

Завідувач кафедри,  
д-р техн. наук, проф.

\_\_\_\_\_ І. М. Журавська

«\_\_» \_\_\_\_\_ 2023 р.

**КВАЛІФІКАЦІЙНА МАГІСТЕРСЬКА РОБОТА**  
**Система балансування навантаження у мережі**  
**автономних сонячних генераторів**

Спеціальність 123 «Комп'ютерна інженерія»

123 – КМР.1 – 605.21710528

**Студент**

\_\_\_\_\_ О. О. Стокроцький

*підпис*

«\_\_» \_\_\_\_\_ 2023 р.

**Керівник** канд. техн. наук, доцент

\_\_\_\_\_ В. Ю. Савінов

*підпис*

«\_\_» \_\_\_\_\_ 2023 р.

**Миколаїв – 2023**

---

## ЗМІСТ

|   |    |
|---|----|
| ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ.....  | 4  |
| ВСТУП .....   | 5  |
| Розділ 1 Аналітична частина. Огляд існуючих рішень системи, що розробляється. Формування вимог до апаратно-програмного забезпечення ... | 8  |
| 1.1 Огляд існуючих рішень .....   | 8  |
| 1.2 Постановка задачі та формування вимог.....  | 14 |
| 1.3 Висновки до розділу 1 .....   | 19 |
| РОЗДІЛ 2 МАТЕМАТИЧНІ МЕТОДИ ТА ПРОЄКТУВАННЯ СИСТЕМИ,<br>ЩО РОЗРОБЛЯЄТЬСЯ .....  | 20 |
| 2.1 Принцип роботи сонячної панелі .....  | 20 |
| 2.2 Принцип роботи інвертора.....   | 25 |
| 2.3 Принцип роботи реле.....  | 27 |
| 2.4 Особливості різних видів акумуляторів .....   | 30 |
| 2.5 Висновки до розділу 2 .....   | 34 |
| РОЗДІЛ 3 АПАРАТНО-ПРОГРАМНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ СИСТЕМИ.....   | 35 |
| 3.1 Підбір компонентів апаратного комплексу .....   | 35 |
| 3.2 Побудова структурної, принципової та макетної схеми .....   | 50 |
| 3.3 Вибір мови програмування та середовища розробки.....  | 53 |
| 3.4 Опис використаних функцій .....   | 55 |
| 3.5 Висновки до розділу 3 .....   | 57 |
| РОЗДІЛ 4 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ .....   | 58 |
| 4.1 Порівняння розробленої системи з існуючими рішеннями та<br>пошук шляхів покращення системи.....                                     | 58 |
| 4.2 Порівняння надійності та ціни системи при різній кількості<br>генераторів.....  | 66 |
| Висновки до розділу 4 .....   | 70 |
| ВИСНОВКИ.....   | 71 |

---

|                                 |    |
|---------------------------------|----|
| ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ .....  | 73 |
| ДОДАТОК А Лістинг коду .....    | 80 |
| ДОДАТОК Б Макетна схема.....    | 82 |
| ДОДАТОК В Принципова схема..... | 83 |

## **ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ**

ККД - коефіцієнт корисної дії

МР – магістерська робота

ПЗ – програмне забезпечення

AC - Alternating Current

AGM - Absorbent Glass Mat

DC - Direct Current

GPIO - General-Purpose Input/Output

IDE - Integrated Development Environment

IGBT - Insulated-Gate Bipolar Transistor

MOSFET - Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor

MPPT - Maximum Power Point Tracking

RAM - Random Access Memory

SSR - Solid State Relay

UPS - Uninterruptible Power Supply

## ВСТУП

Сонячна енергетика, тобто використання сонячної енергії для отримання електричної, активно розвивається та стає все більш розповсюдженою. Так, з 2010 до 2021 року об'єм сонячної енергетики виріс більш ніж в 33 рази (31 Twh – 1023 Twh) [1]. Судячи з такої динаміки та абсолютних значень, можна зробити висновок, що ця область енергетики буде і далі розвиватись і розширюватись. Так, за даними The International Energy Agency за сценарієм «Net Zero by 2050» очікується ріст об'єму сонячної енергетики з 2021 по 2030 ще майже в 7 разів (1023 - 7000 Twh) в абсолютних показниках та майже в 5 разів в відсотках від загального об'єму світової енергетики (4 – 19 %). В першу чергу, такий ріст очікується за рахунок зменшення частки використання вугільної електроенергії (з 35% до 8%) та газової електроенергії (з 22% до 17%). Автори звіту пов'язують це, в першу чергу з Паризькою угодою (2015р) щодо регулювання заходів зі зменшення викидів діоксиду вуглецю з 2020 р. [2].

Це зумовлено рядом переваг такої сфери енергетики перед іншими. Основними перевагами є:

- Безпека для природнього середовища. Генерування електроенергії з сонячної не призводить до значних викидів діоксиду вуглецю чи ризиків радіаційного забруднення.

- Невичерпність джерела. Це велика перевага насамперед перед нафтовою, газовою та вугільною промисловостями. Такі джерела енергії формуються мільйони років, а витрачаються за сотні років. З нинішнім темпом витрат газу, вугілля та нафти їх залишилося на 53, 54 і 110 років відповідно [3].

- Енергетична незалежність. Це відноситься як до країн, які стають незалежними від поставок нафти, газу та вугілля так і до окремих підприємств чи приватних будинків, у яких з'являється можливість створення

автономних систем, які не мають потреби бути під'єднаними до централізованої електричної системи.

Балансування навантаження – це використання електроенергії таким чином, щоб знизити навантаження на окремі елементи та накопичувати надлишкову електроенергію в періоди низького споживання з метою вивільнити її коли в цьому виникає потреба. Метою системи є досягти того, щоб фактор навантаження дорівнював одиниці. Фактор навантаження можна розрахувати за формулою [4]:

$$f_{load} = \frac{P_{average} \times T}{P_{peak} \times T},$$

де  $P_{average}$  – середнє навантаження;

$P_{peak}$  – пікове навантаження;

$T$  – одиниця часу.

Так як пікове навантаження завжди більше середнього, то фактор навантаження не може бути більшим за одиницю. Завдяки накопичуванню надлишків електроенергії і використанню їх в періоди пікового навантаження, можна досягти фактору навантаження в 1.

Система балансування навантаження у мережі автономних сонячних генераторів має дві змінні: споживання електроенергії та її видобуток. Споживання електроенергії залежить від користувачів цією системою, а видобуток від сонячної освітленості. Освітленість значно змінюється протягом доби, тому система має включати в себе акумулятори. Так як переважна більшість сучасних електричних пристроїв потребує змінного струму, система має включати в себе інвертори. Отже, система має складатись із таких компонентів: сонячні панелі як джерело електроенергії, акумулятори для резерву та зменшення волатильності номінальної потужності системи, інвертори для перетворювання постійного струму в змінний 220В 50Гц та контролеру для балансування навантаженням.

**Мета:** створення проекту системи балансування навантаження у мережі автономних сонячних генераторів.

**Об'єкт:** система балансування навантаження у мережі автономних сонячних генераторів.

**Предмет:** методи балансування навантаження у мережі автономних сонячних генераторів.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі **завдання:**

- аналіз переваг та недоліків існуючих рішень;
- аналіз апаратної частини комплексу та підбір необхідних компонентів системи, розрахунок необхідної потужності та ємності акумуляторів;
- розробка схеми підключення компонентів апаратної частини проекту у одному з середовищ розробки схем та друкованих плат;
- розробка програмне забезпечення для роботи системи.

**Практичне значення** отриманих результатів: готовий результат виконання цієї роботи можна використовувати для електроживлення приватного будинку.

**Актуальність** магістерської роботи полягає в використанні автономних сонячних генераторів і використанні розподіленої системи замість централізованої, яку використовують усі подібні системи сьогодні.

Робота пройшла апробацію під час XXV Всеукраїнської науково-практичної конференції «Могилянські читання» (Миколаїв, 07–11 листопада 2022 р.).

Публікації. Основні положення магістерської роботи опубліковані у збірнику матеріалів XXV Всеукраїнської науково-практичної конференції «Могилянські читання–2022» [5].

## Розділ 1 Аналітична частина. Огляд існуючих рішень системи, що розробляється. Формування вимог до апаратно-програмного забезпечення

Відомим рішенням, що вирішує ту ж саму проблему, що і магістерська робота, а саме створює автономну систему, що дозволяє жити приватний будинок від сонячної енергії, позбавляючи власника такої системи від залежності від споживання електроенергії з централізованого джерела (а саме держави) є домашні сонячні електростанції.

Домашня сонячна електростанція – це система з підібраних компонентів, для перетворення сонячної енергії в електричну, зберігання та керування нею з метою заживити електроенергією приватний будинок.

### 1.1 Огляд існуючих рішень

В рамках магістерської роботи було розглянуто автономну сонячну електростанцію на 5 кВт від українського виробника «Сонячна енергія». Ціна такої системи становить 6440 \$ [6]. На рис. 1.1 зображено схему роботи цієї системи.



Рис. 1.1 – Схема домашньої сонячної електростанції.

Система складається з таких компонентів:



- 10 сонячних панелей Risen Energy RSM110-8-540M потужністю 540 Вт кожна;
- інвертор Ахіома Energy ISMPPT-BF 5600 потужністю 5.6 кВт, інвертор на виході видає правильну синусоїду;
- гелеві акумулятори LogicPower LPM - GL 200AH ємністю 200 А\*Год кожен та вихідною напругою 12В;
- кріплення для встановлення та збірки системи (Т-подібні болти, гайки до них, міжпанельний прижим, алюмінієві рейки);
- 80м солярного кабелю (одножильний кабель, виготовлений з міді стандартної для хорошої провідності струму якості), міжакумуляторна перемичка, конектори MC4.

### Інвертор

Інвертор Ахіома Energy ISMPPT-BFP5600 є високоякісним автономним інвертором. Він доповнений функцією автономного живлення. Серед особливостей цього пристрою можна виділити можливість на вході одночасно отримувати електроенергію від сонячних панелей та мережі змінного струму 220 В 50 Гц.

На рис. 1.2 зображено зовнішній вигляд інвертору Ахіома Energy ISMPPT-BFP5600.



Рисунок 1.2 – зовнішній вигляд інвертору Ахіома Energy ISMPPT-BFP5600 [7].

Характеристики інвертору зображені в табл. 1.1.

Таблиця 1.1. Характеристики інвертору Ахіома Energy ISMPPT-BFP 5600.[8]

| Компонент   | Кількість  |
|---|--|
| Потужність  | 5.6 кВт  |
| Номінальна напруга  | 230 В  |
| Діапазон робочої напруги  | 90 – 280 В   |
| Робоча частота  | 50 Гц, 60 Гц                                       |
| Перенапруга   | 11.2 кВт   |
| ККД   | 90-93%   |
| Час, неюхідний для переключення між джерелами живлення. Акумулятор – мережа, чи мережа - акумулятор | 15 – 20мс  |
| Форма вихідної напруги  | Чиста синусоїда                                    |
| Напруга акумулятора   | 48 В   |
| Плаваюча напруга заряду   | 54 В   |
| Пікова потужність   | 6 кВт  |
| Максимальний зарядний струм   | 120А   |
| Габарити, Г x Ш x В (мм)  | 115 x 300 x 400                                    |
| Вага (кг)   | 10   |
| Комунікаційні інтерфейси  | USB, RS232, RS485, WiFi, Сухий контакт             |
| Вологість (робоча)  | Відносна вологість від 5% до 95% (без конденсації) |
| Робоча температура  | -10°C до 50°C                                      |
| Температура зберігання  | -15°C до 60°C                                      |

Серед переваг цього інвертору можна виділити:

- Maximum Power Point Tracking (MPPT) контролер;

- LED дисплей;
- вбудований Wi-Fi модуль, що дозволяє стежити за роботою інвертору з мобільного телефону за допомогою спеціального застосунку.
- функція USB On-the-Go;
- можливість роботи в Battery Free режимі (без акумуляторів);
- можливість налаштування та зміни джерела електроживлення (сонячні панелі, мережа змінного струму 220 В, акумулятори);
- можливість зміни пріоритетів живлення через РКІ інтерфейс;
- відновлення електроживлення від мережі 220В при її наявності після відключень централізованого електроживлення;
- захист від короткого замикання;
- низький нагрів.

### **Сонячні панелі**

Джерелом генерування електроенергії є набір десяти сонячних фотомодулів моделі Risen Energy RSM110-8-540M. Вони мають високу (540 Вт на панель) вихідну потужність з високим (20.7%) ККД. Зовнішній вигляд панелі Risen Energy RSM110-8-540M зображено на рис. 1.3.



Рисунок 1.3 – Зовнішній вигляд сонячної панелі Risen Energy RSM110-8-540M.

Сонячна панель має наступні характеристики:

- потужність: 540 Вт;
- ККД: 20.7%;
- максимальна напруга: 31.46 Вт;
- максимальний струм 17.17;
- максимальна напруга: 1500 В;
- діапазон робочої температури: від -40 до +85 °С;
- кількість фотоелементів у панелі: 110 шт.;
- габарити: 2384x1096x35 мм;
- вага: 29 кг [9].

### Акумулятор

Гелевий акумулятор LogicPower LPM - GL 200AH ємністю в 200 А\*Год – це повністю герметичне джерело електроренергії. Він не вимагає технічного обслуговування. Зовнішній вигляд цього акумулятора зображено на рис 1.4.



Рисунок 1.4 – зовнішній вигляд акумулятора LogicPower LPM - GL 200AH.

Акумулятор LogicPower LPM - GL 200AH є гелевим. Це означає. Що його було виготовлено за спеціальною технологією. Його електроліт має гелеподібну форму і був залитий до корпусу за допомогою вакуумного

насосу. Таким чином досягається рівномірне розподілення електроліту в корпусі та його щільний контакт з пластинами. Це дає такі переваги:

- більша в порівнянні зі свинцево-кислотними акумуляторами ємність;
- менша корозія пластин, що подовжує термін служби;
- висока тепловіддача;
- однорідна реакція на всій площині пластин [11].

Основні характеристики LogicPower LPM - GL 200AH:

- термін служби: до 10 років або до 1000 циклів заряд-розряд;
- стовідсоткова герметичність, що робить можливим використання акумулятору в жилих приміщеннях;
- ємність: 200 А\*Год;
- напруга: 12 В;
- зарядна напруга: 14 В
- максимальний струм заряду: 50 А, з чого випливає мінімальний час заряду з 0 до 100% - 3.4 год.;
- діапазон робочої температура: від -20 до +60 °С;
- габарити: 523x237x225 мм.;
- вага: 59 кг. [10]

Ємність одного акумулятора 200 А \* год. Тобто загальна накопичена електроенергія:

$$E = C \times n \times U,$$

де  $E$  - накопичувана системою енергія;

$C$  – ємність одного акумулятору;

$n$  – кількість акумуляторів;

$U$  – напруга акумулятору.

$$E = 200 \times 4 \times 12 = 9600 \text{ (Вт * год)}$$

Так як коефіцієнт корисної дії інвертору менше одиниці, то варто розрахувати корисну накопичену енергію:

$$E_k = 9600 \times 0.93 = 8928 \text{ (Вт * год)}$$

Отже, накопичена корисна енергія 8929 Вт \* год. Тобто на 12 годин (тривалість темної частини доби, коли сонячні панелі не виробляють, або майже не виробляють електроенергію) можна користуватись електроенергією потужністю 744 Вт.

## 1.2 Постановка задачі та формування вимог

Основним недоліком існуючих зараз автономних сонячних електростанцій для приватного будинку є невисока надійність таких систем. Якщо з ладу вийде інвертор чи сонячна панель або їх сполучення – система не зможе працювати, а час роботи від акумуляторів (навіть повністю заряджених) є досить нетривалим. Це є особливо критичним в ситуаціях, коли в будинку електроенергія використовується для обігріву та приготування їжі.

Одним з варіантів вирішення цієї проблеми – використання певної кількості автономних сонячних генераторів. Під автономним сонячним генератором в автономній сонячній електростанції мається на увазі частина такої системи що має складатися з сонячних панелей, датчику напруги, реле та інвертору. Схема автономного сонячного інвертору зображена на рис. 1.5.

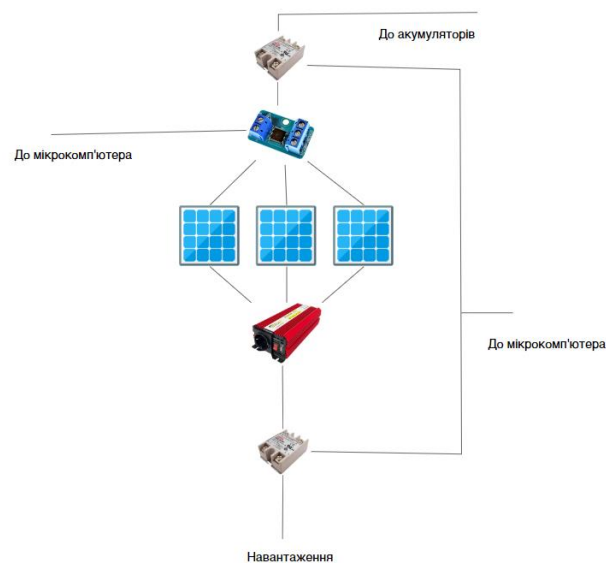


Рисунок 1.5 – Схема автономного сонячного генератора.

Таких генераторів має бути певна кількість (більша за одиницю). Чим більше таких генераторів в системі – тим більш децентралізованою та надійною є система. Також в системі має бути акумуляторний генератор для накопичення електроенергії. Його схему зображено на рис. 1.6.



Рисунок 1.6. – акумуляторний генератор.

В схемі присутні такі компоненти:

- сонячні елементи для перетворення сонячної електроенергії в електричну;
- акумулятори для накопичення електроенергії. Незважаючи на високу надійність такої системи, в ній повинні бути акумулятори, так як сонячна освітленість протягом доби є змінною, а потреба в електроенергії постійна;
- інвертори для перетворення напруги на 220В 50Гц, необхідних для роботи більшості електричних пристроїв. Так як в системі буде використовуватися декілька інверторів ( по одному на автономний сонячний генератор), то потужність кожного інвертору може бути нижчою ніж в системах, де використовуються один інвертор;
- реле для підключення / відключення автономних сонячних генераторів. Сонячний генератор слід відключати від системи не лише при

поломці одного чи декількох його компонентів, а й у випадках низької продуктивності генератору (коли він наприклад знаходиться у тіні) чи коли система не потребує такої потужності (вимкнення генератору пролонгує роботу інвертору) ;

– датчики напруги для отримання інформації про потужність, яку можна отримати з кожного генератору в реальному часі. Потужність датчиків, що встановлюються на кожному генераторі має перевищувати потужність генератору;

– мікрокомп'ютер, що і буде зчитувати інформацію з датчиків напруги, оброблювати цю інформацію та вмикати / вимикати реле для керування сонячними генераторами;

Така система може інтегруватись у так звану розумну енергосистему. Розумна енергосистема – це система, що включає в себе оперативні та енергоощадні заходи, такі як поновлювані джерела енергії, розумні споживач та лічильники та ресурси забезпечення енергоефективності.

На рис. 1. 7. Зображено схему роботи розумної енергосистеми:

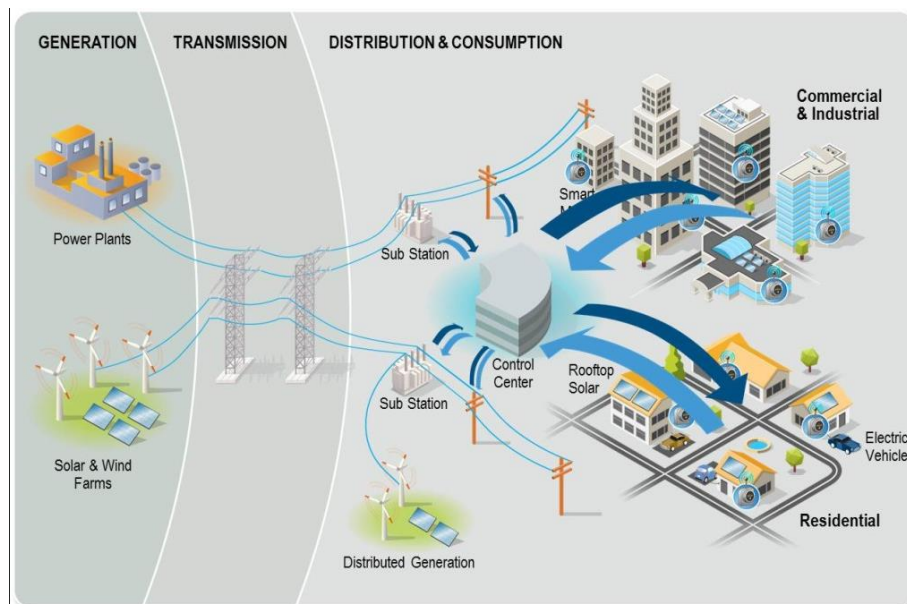


Рисунок 1.7 – схема роботи розумної енергосистеми.

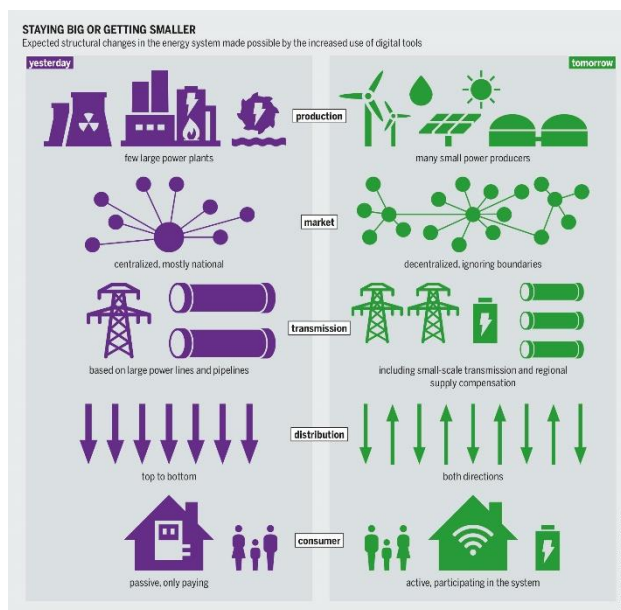
Серед таких заходів забезпечення енергоефективності:



- розширена інфраструктура вимірювання (з якої інтелектуальні лічильники є загальною назвою для будь-якого побутового пристрою, навіть якщо він є більш потужним);
- інтелектуальні розподільчі щити та автоматичні вимикачі, інтегровані з системою управління будинком і реагуванням на попит (за лічильником з точки зору комунального підприємства);
- перемикачі керування навантаженням та інтелектуальні пристрої, які часто фінансуються за рахунок підвищення ефективності муніципальних програм;
- відновлювані джерела енергії, включно з масивом акумуляторів для резерву;
- енергоефективні ресурси.

В такій системі приватні будинки під'єднані до централізованої енергосистеми, але можуть не тільки споживати електроенергію, але й продавати надлишки власної електроенергії (сонячної та вітрової). Така система має бути надійною, гнучкою, ефективною та стійкою. [12]

На рис 1.8. зображені відмінності розумної енергосистемою від централізованої енергетичної системи.



---

Рисунок 1.8. - Порівняння централізованої енергетичної системи з розумною енергосистемою (Smart Grid).

Ці відмінності (по рівням):

– на рівні джерел електроенергії це відмова від шкідливих для довкілля та потенційно небезпечних джерел електроенергії (в першу чергу від вугільної, газової та ядерної енергетики);

– на рівні ринку це децентралізація – тобто відсутність залежності від головного постачальника електроенергії (в більшості випадків держави). Це означає, що в такій системі зведена до мінімуму можливість повного знеструмлення, так як в системі є велика кількість постачальників електроенергії (в більшості приватні будинки) ;

– на рівні передачі це знову ж таки децентралізація. Тобто така енергосистема складається з великої кількості невеликих зв'язків, що дозволяє купувати електроенергію у найближчих постачальників при недостатності або поломці власних джерел електроенергії;

– на рівні дистрибуції це можливість не тільки купувати, а й продавати електроенергію;

– на споживчому рівні це перехід від пасивних користувачів до активних.

Основна перевага такої системи перед іншими – висока надійність, основні задачі при створенні такої системи:

– проаналізувати апаратну частину комплексу та підібрати необхідні компоненти системи, розрахувати необхідну потужність акумуляторів, сонячних елементів, реле, датчиків та ємність акумуляторів;

– розробити схему підключення компонентів апаратної частини проекту у одному з середовищ розробки схем та друкованих плат;

– розробити програмне забезпечення для роботи системи;

---

– розрахувати оптимальну кількість автономних сонячних генераторів для збереження надійності та мінімізації ціни системи.

### **1.3 Висновки до розділу 1**

Було проаналізовано існуючі рішення автономного сонячного електроживлення та виявлено їхній основний недолік – низька надійність. При поломці чи пошкодженні одного елемента (інвертору) вся система виходить з ладу і не може функціонувати далі. Було запропоноване рішення такої проблеми – використання автономних сонячних генераторів в кількості більше одного, що дає можливість системі продовжувати роботу. Був описаний термін «автономний сонячний генератор» і описано як має працювати така система.

Крім цього була сформована задача:

- розрахунок вимог до кожного елемента апаратної частини;
- підбір елементів апаратної частини;
- реалізація програмної частини;
- створення схеми в одному із середовищ розробки.

---

## РОЗДІЛ 2 МАТЕМАТИЧНІ МЕТОДИ ТА ПРОЄКТУВАННЯ СИСТЕМИ, ЩО РОЗРОБЛЯЄТЬСЯ

Як було описано в першому розділі, система автономних сонячних генераторів повинна складатись з таких компонентів:

- мікрокомп'ютер для керування автономними сонячними генераторами;
- датчики напруги на кожному генераторі. Згідно з даними з датчиків, мікроконтролер буде приймати рішення які сонячні генератори вмикати, а які – вимикати;
- сонячні панелі – для генерації електроенергії;
- інвертори – для перетворення – постійного струму з сонячних панелей на змінний струм для роботи побутових електроприладів;
- реле – для балансування навантаження. Система повинна вмикати чи вимикати певні автономні сонячні генератори використовуючи реле.

### 2.1 Принцип роботи сонячної панелі

Сонячна панель – це сукупність сонячних елементів. Сонячний елемент – це електричний пристрій, що перетворює світлову енергію в електричну за допомогою фотоелектричного ефекту. Сонячна елемент представляє собою діодом з p-n переходом.

Звичайний кремнієвий сонячний елемент з одним переходом може виробляти максимальну напругу холостого ходу приблизно від 0,5 до 0,6 вольт. Це дуже небагато, але при цьому сонячний елемент має невеликий розмір, що дозволяє використовувати велику їх кількість одночасно, послідовно поєднавши у сонячну панель.

Принцип роботи сонячного елемента зображено на рис. 2.1.

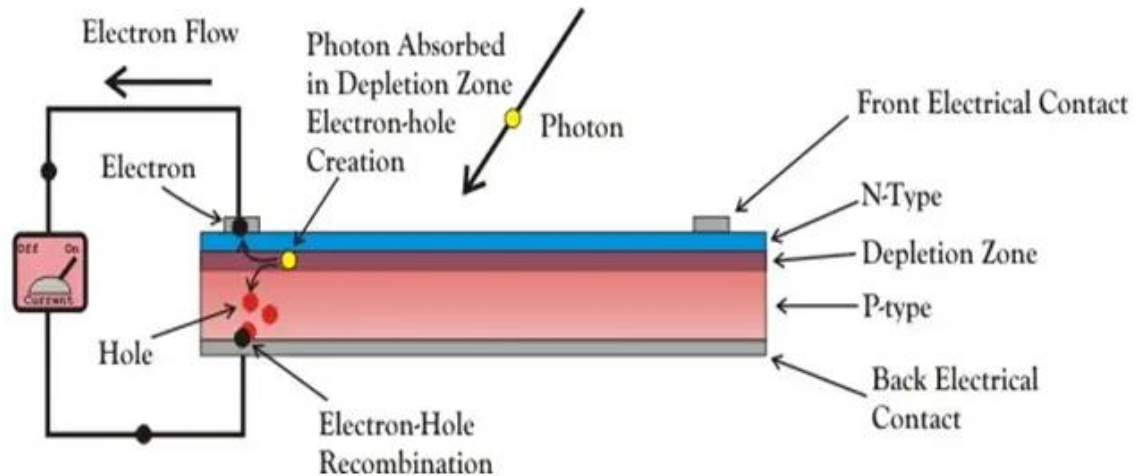


Рисунок 2.1. – принцип роботи сонячного елемента.

Коли світло досягає р-п переходу, фотони світла можуть легко проникати в перехід через дуже тонкий шар р-типу. Світлова енергія у вигляді фотонів постачає переходу достатню кількість енергії для створення певної кількості електронно-діркових пар. Падаюче світло порушує стан теплової рівноваги переходу. Вільні електрони в області збіднення можуть швидко перейти на бік n-типу переходу [13].

Аналогічно, дірки в області збіднення можуть швидко перейти на бік р-типу переходу. Після того, як новостворені вільні електрони потрапляють на сторону n-типу, вони не можуть далі перетинати перехід через бар'єрний потенціал переходу.

Новостворені дірки, що потрапили на сторону р-типу, не можуть далі перетинати перехід через той самий бар'єрний потенціал переходу. Оскільки концентрація електронів стає вищою з одного боку, тобто з боку n-типу переходу, а концентрація дірок стає більшою з іншого боку, тобто з боку р-типу переходу, р-п перехід поводитиметься як маленька батарейка. Виникає напруга, яка відома як фотонапруга. Якщо підключити невелике навантаження через перехід, то через нього потече струм.

Фотоелектричну енергію фотона можна розрахувати за формулою Планка:

$$E_{\text{photon}} = h\nu,$$

де  $E_{\text{photon}}$  – енергія фотону в Джоулях;

$h$  – стала Планка:  $6.626 \times 10^{-34}$  Дж\*с;

$\nu$  – частота світла в Гц.

Як видно з формули, енергія фотону прямо пропорційно залежить від частоти світла. Це зображено на рис 2.2.

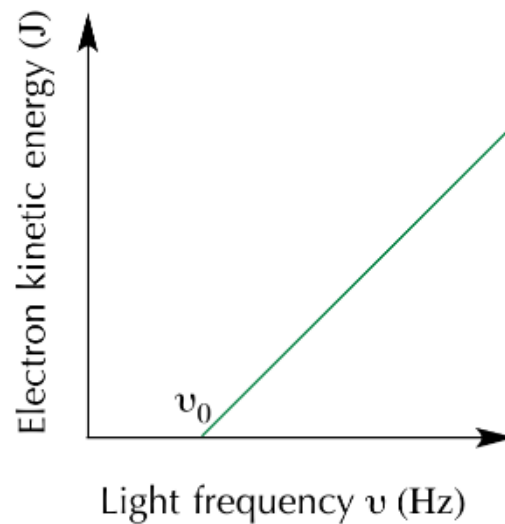


Рисунок. 2.2 – графік залежності кінетичної енергії від частоти світла.

Як видно на рисунку 2.2 – існує певна частота, нижче якої фотоелемент не генерує енергію ( $\nu_0$  на графіку) [14].

Вольт-амперні характеристики фотоелектричного елемента зображено на рис. 2.3

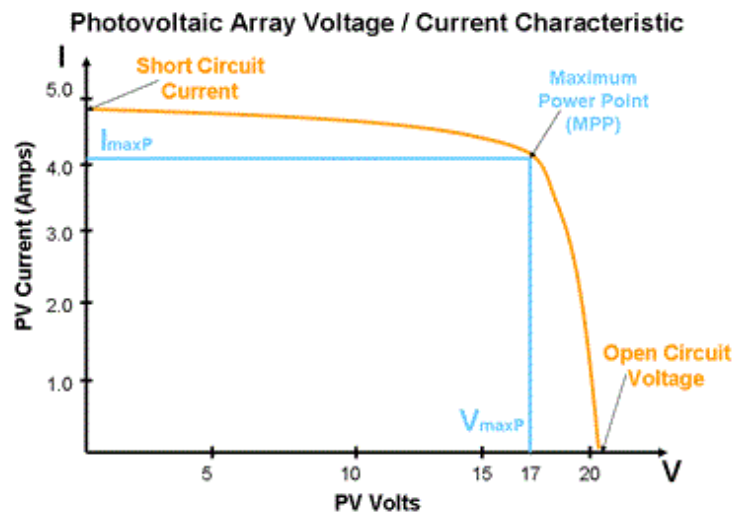


Рисунок 2.3 – Вольт-амперні характеристики сонячного елемента.

Загальну річну електроенергію, що генерує сонячна панель можна розрахувати за формулою:

$$E = A \times r \times H \times PR,$$

де  $E$  – енергія (кВт\*год);

$A$  – площа сонячних панелей ( $\text{м}^2$ );

$r$  – ефективність сонячних панелей (%). В сучасних сонячних панелях це показник у середньому 20%;

$H$  – середньорічна сонячна радіація в місцевості, де встановлені сонячні панелі (кВт\*год/  $\text{м}^2$ );

$PR$  – ККД (коефіцієнт корисної дії) системи без урахування втрат ефективності на безпосередньо сонячних панелях.

Середньорічна сонячна радіація залежить від місцевості – від 200 кВт\*год/  $\text{м}^2$  у Норвегії до 2600 кВт\*год/  $\text{м}^2$  у Саудівській Аравії. На рис 2.4 зображена світова мапа середньорічної сонячної радіації:

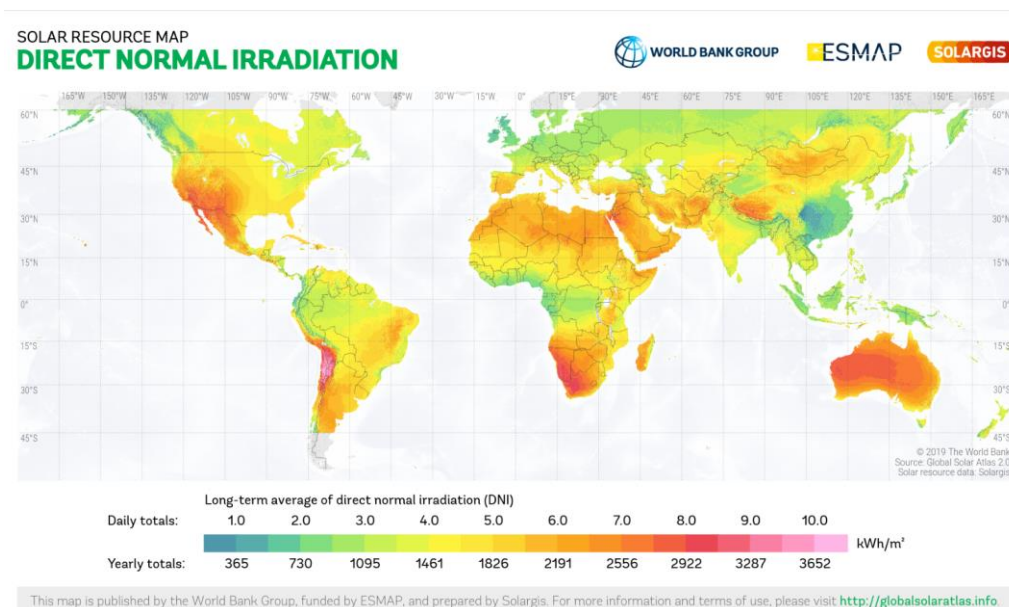


Рисунок 2.4 – розподіл середньорічної сонячної радіації в світі [15].

На мапі видно велику різницю сонячної радіації в світі, а як наслідок велику різницю у доцільності використання сонячної енергетики в різних регіонах світу.

На рис. 2.5 зображено мапу розподілу сонячної радіації в Україні:

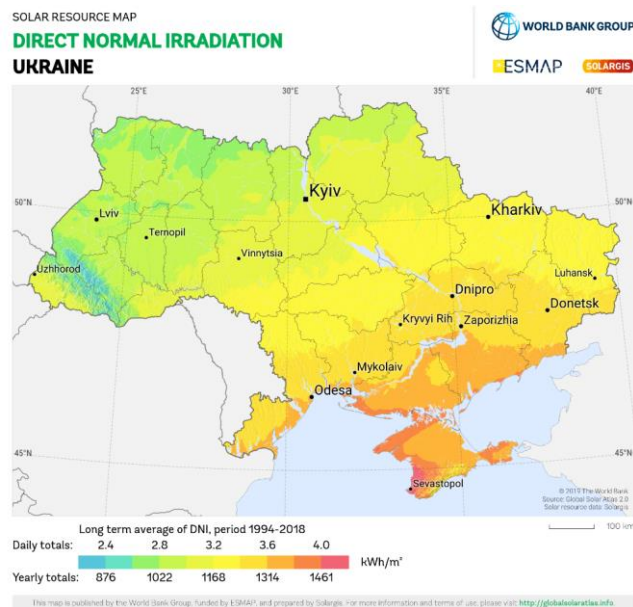


Рисунок 2.5 – розподіл середньорічної сонячної радіації в світі [16].

Як видно з рис. 2.6 найефективніше використовувати сонячну енергетику на півдні України (1300 – 1600 кВт\*год/ м<sup>2</sup>). Крім цього, Україна має діапазон 900 – 1500 річної сонячної радіації кВт\*год/ м<sup>2</sup>. Це є достатньо високим показником, тому використання сонячної енергетики в Україні є доцільним.

Приклади факторів, що впливають на PR:

- втрати інвертора (від 4% до 10%);
- температурні втрати (від 5% до 20%);
- втрати в кабелях постійного струму (від 1 до 3 %);
- втрати в кабелях змінного струму (від 1 до 3 %);
- затінення від (0% до 80%). Цей фактор має найбільший вплив на ККД системи, тому автономні сонячні панелі слід розміщувати в різних місцях для компенсації затемнень в різних місцях. Це також можна віднести до переваг автономних сонячних генераторів перед стандартними сонячними електростанціями;
- втрати при слабкому випромінюванні (від 3% до 7%);



- втрати через пил (2%) [17].

Як видно вище, ККД може понижувати велика кількість факторів, всі врахувати неможливо, тому система має мати сонячні панелі з певним запасом потужності.

Переваги сонячних панелей:

- відсутність забруднення, пов'язаного з ним;
- він повинен служити протягом тривалого часу;
- відсутність витрат на обслуговування.

Недоліки сонячних панелей:

- висока вартість установки;
- має низький коефіцієнт корисної дії;
- у похмурий день енергія не може вироблятися, а також вночі сонячні панелі не генерують електроенергію. Це компенсуються наявністю в системі автономних сонячних генераторів, але сумарна потужність сонячних панелей має значно перевищувати споживання для того, щоб паралельно заряджати акумулятори, енергію яких буде використано в темну частину доби.

## 2.2 Принцип роботи інвертора

Інвертор - один з найважливіших компонентів в сонячній енергетичній системі. Це пристрій, який перетворює електроенергію постійного струму (DC), яку генерує сонячна панель, в електроенергію змінного струму (AC), яку використовує побутова електромережа. У постійному струмі напрямок і напруга не змінюється протягом часі. В змінному струмі напрямок і напруга періодично змінюються протягом часу.

В результаті вхід постійного струму перетворюється на вихід змінного струму. Крім того, фільтри та інша електроніка можуть використовуватися для отримання напруги, яка змінюється у вигляді чистої синусоїди, що повторюється, яку можна подавати в електромережу. Синусоїда - це форма, яку напруга набуває з часом, і це модель потужності, яку мережа може

---

використовувати без пошкодження електричного обладнання, яке побудоване для роботи на певних частотах і напругах [18].

Інвертори можна поділити за формою вихідної хвилі:

- інвертори прямокутних;
- інвертори хвиль модифікованої синусоїди;
- інвертори хвиль чистої синусоїди.

Найефективнішим і найскладнішим типом інвертора є інвертор хвилі чистої синусоїди. Він генерує чисту синусоїду, яка є аналогічною формою хвилі напруги в електромережі. Все обладнання змінного струму призначене для роботи на синусоїдальному сигналі.

Такий інвертор має найменші втрати. Але вартість такого інвертора дуже найвища в порівнянні з іншими видами інверторів. Цей тип інверторів широко використовується в житлових і комерційних цілях [19].

Схема інвертора зазвичай складається з силових електронних перемикачів, таких як MOSFET або IGBT, конденсаторів, котушок індуктивності та трансформаторів. Напруга постійного струму подається на вхід схеми інвертора, який перемикає напругу постійного струму вперед і назад на високій частоті, створюючи імпульсний сигнал постійного струму. Потім високочастотна напруга змінного струму фільтрується фільтром низьких частот для створення плавної синусоїдальної напруги змінного струму.

Частоту вихідної напруги змінного струму можна регулювати, керуючи частотою перемикання силових електронних перемикачів. Це дозволяє інвертору генерувати напругу змінного струму з різними частотами, що робить його універсальним пристроєм для багатьох застосувань, таких як системи відновлюваної енергії, джерела безперебійного живлення (UPS) і перетворювачі частоти.

Інвертори для сонячної енергетики мають низку особливостей:

– Відстеження точки максимальної потужності (MPPT): сонячні панелі генерують максимальну потужність при певній напрузі та струмі, а алгоритми MPPT використовуються для оптимізації перетворення енергії від сонячних панелей до інвертора. Це забезпечує максимальне перетворення енергії та допомагає зменшити її втрати.

– ефективність: Інвертори для сонячних електростанцій повинні бути високоефективними, щоб мінімізувати втрати енергії та максимізувати її перетворення. Високоефективні інвертори, як правило, дорожчі за менш ефективні моделі, але вони є вигідною інвестицією для багатьох сонячних енергетичних систем;

– можливість підключення до електромережі: Деякі інвертори для сонячних систем мають можливість підключення до мережі, що дозволяє повертати надлишкову енергію, вироблену сонячними панелями, назад в мережу. Це може допомогти знизити загальну вартість сонячної енергетичної системи і підвищити ефективність виробництва енергії;

– функції безпеки: Сонячні енергетичні системи піддаються впливу природних факторів і можуть становити потенційну загрозу безпеці, тому важливо вибрати інвертор, який має такі функції безпеки, як захист від перевантаження по струму, перегріву і короткого замикання.

### 2.3 Принцип роботи реле

Реле - це електромагнітний перемикач, який розмикає і замикає ланцюги електромеханічним або електронним способом. Відносно невеликий електричний струм, який може увімкнути або вимкнути набагато більший електричний струм, керує реле. Реле працюють як деякі електричні вироби, оскільки вони отримують електричний сигнал і надсилають його на інше обладнання, вмикаючи та вимикаючи вимикач. Навіть якщо контакт реле нормально замкнутий або нормально розімкнутий, він не перебуває під напругою. Його стан зміниться лише тоді, коли подати на контакти електричний струм. На рис. 2.6. зображено зовнішній вигляд реле.



Рисунок 2.6 – зовнішній вигляд реле.

Реле використовуються у багатьох сферах. Електромагнітні реле захищають різне обладнання змінного та постійного струму. Вони також використовуються для керування навантаженням як у мережі постійного, так і змінного струму. На рис 2.7 зображено схему реле.

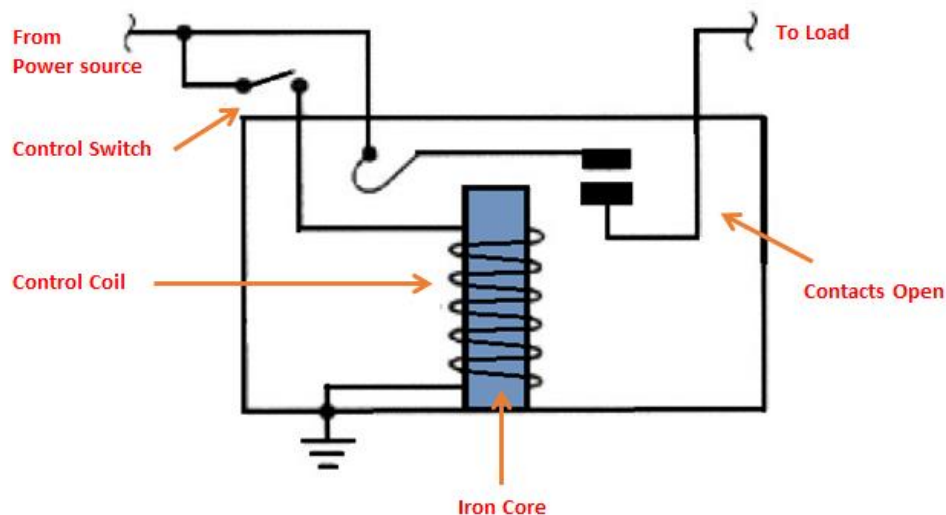


Рисунок 2.7 – схема роботи контактного реле.

Котушка управління оточує залізний сердечник. Електромагніт починає заряджатися, коли струм протікає через котушку управління, а потім підсилює магнітне поле. Електромагніт з'єднується з джерелом живлення через контакти з навантаженням і перемикачем управління. Верхній

контактний важіль притягується до нижнього нерухомого важеля і замикає контакти, що призводить до короткого замикання. Після знеструмлення реле контакт рухається у зворотному напрямку і створює розімкнутий ланцюг.

Рухомий якір повернеться у вихідне положення, коли струм котушки вимкнеться. Сила, яка викликає його рух, буде майже такою ж, як половина сили магнітного притягання. Цю силу забезпечують пружина і сила тяжіння[20].

Для того, щоб змінити стан реле необхідно, щоб на котушці виникала достатня сила магнітного поля при подачі сили струму. Математично можна описати силу магнітного поля через формулу:

$$B = \frac{\mu * I * N}{L},$$

де  $B$  – сила магнітного поля (Т);

$\mu$ – магнітна проникність (Г/м);

$I$  – сила струму (А);

$N$ – кількість витків котушки;

$L$  – Довжина котушки (м).

Окрім контактих реле, існують і безконтактні або MOS-транзисторні реле. Однією з основних характеристик MOS-транзисторного реле є те, що в ньому використовується напівпровідник, тому контакти не розмикаються/замикаються механічно. Як наслідок, переваги включають зменшення займаної площі, безшумну роботу, довший термін служби та відсутність необхідності в додатковому обслуговуванні. Їхні особливості:

- набагато менша вага;
- менший керуючий струм (0.2 мА замість 2-15 мА у контактних реле);
- довший термін експлуатації;
- малий струм витоку;
- відмінна ударостійкість;

- безшумна робота;
- висока ізоляція;
- висока швидкість перемикання;
- точний контроль мікро аналогового сигналу [21].

Реле можуть працювати двома способами. Перший - при низькій напрузі, а другий - при високій напрузі. У низьковольтних схемах вони використовуються для зменшення шуму всього ланцюга. З іншого боку, реле зменшують іскроутворення у високовольтних системах.

#### **2.4 Особливості різних видів акумуляторів**

Як було описано в першому підпункті другого розділу, потужність та ефективність сонячних панелей значно змінюється в часі, тому акумулятор є важливим компонентом в системі сонячного електроживлення. Акумулятор – це пристрій, що використовується для накопичення електроенергії. Він здатен заряджатися та розряджатися.

За типом, акумулятори, що використовуються у сонячній енергетиці можна поділити на:

- AGM (Absorbent Glass Mat);
- GEL;
- Li-Ion;
- LiFePo4.

У батареях AGM (Absorbent Glass Mat) для поглинання та утримання електроліту використовується скловолоконний мат, що робить їх герметичними і такими, що не потребують технічного обслуговування. Зазвичай вони мають термін служби 5-7 років за умови належного обслуговування та використання. Вони відомі своєю високою швидкістю заряду, тривалим терміном служби і хорошою продуктивністю при глибокому циклічному циклі. Вони зазвичай використовуються в системах резервного живлення, автофургонів і човнах, коштують дорожче, ніж

---

традиційні свинцево-кислотні акумулятори, але забезпечують кращу продуктивність у складних умовах експлуатації.

Переваги:

- висока швидкість заряду;
- тривалий термін служби (5-7 років);
- хороші показники при глибокому циклічному розряді;
- стійкість до вібрації та ударів.

Недоліки:

- дорожчі за традиційні свинцево-кислотні акумулятори;
- можуть бути більш чутливими до перезарядження і недозарядження порівняно з іншими типами акумуляторів [22].

Термін служби GEL-акумуляторів зазвичай становить 6-8 років за умови належного обслуговування та використання. Замість рідкого електроліту в них використовується гель на основі силікагелю, що робить їх захищеними від протікання і не потребують обслуговування. Вони є хорошим вибором для систем, які вимагають високої стабільності та постійної вихідної напруги, наприклад, для фотоелектричних систем. Вони мають низький рівень саморозряду і можуть тривалий час зберігати заряд, коли не використовуються, але вони також дорожчі, ніж AGM-батареї.

Переваги:

- захищені від протікання і не потребують обслуговування;
- висока стабільність і постійна вихідна напруга;
- низький рівень саморозряду;
- можуть довго зберігати заряд, коли не використовуються.

Недоліки:

- дорожчі, ніж AGM акумулятори;
- не такі ефективні, як AGM-батареї в деяких сферах застосування;
- можуть бути чутливі до перезарядження та недозарядження порівняно з іншими типами акумуляторів [23].

---

Li-Ion (літій-іонні) акумулятори зазвичай мають термін служби 2-3 роки за умови належного обслуговування та використання. Вони мають високу щільність енергії та низький рівень саморозряду, що робить їх ідеальними для портативної електроніки та електромобілів. Вони мають довгий термін служби, але й дорожчі порівняно з іншими технологіями акумуляторів. Вони чутливі до високих температур і потребують захисних схем для запобігання перезарядки і перегріву.

Переваги:

- висока щільність енергії;
- низький рівень саморозряду;
- ідеально підходять для портативної електроніки та електромобілів;
- тривалий термін служби.

Недоліки:

- дорожчі порівняно з іншими технологіями акумуляторів;
- чутливі до високих температур і потребують схем захисту від перезарядження та перегріву;
- можуть бути дорожчими за інші типи акумуляторів [24].

LiFePO<sub>4</sub> (літій-залізо-фосфатні) акумулятори зазвичай мають термін служби 8-10 років за умови належного обслуговування та використання. Це тип літій-іонного акумулятора з підвищеною безпекою та довшим терміном служби порівняно з іншими літій-іонними акумуляторами. Вони мають підвищену безпеку порівняно з іншими літій-іонними акумуляторами, довший термін служби і вищу стійкість до глибокого розряду порівняно з традиційними свинцево-кислотними акумуляторами. Вони також легші і мають менший вплив на навколишнє середовище порівняно зі свинцево-кислотними акумуляторами. Однак вони дорожчі і мають нижчу щільність енергії порівняно з іншими літій-іонними акумуляторами.

Переваги:



- 
- підвищена безпека порівняно з іншими літій-іонними акумуляторами;
  - довший термін служби і вища толерантність до глибокого розряду порівняно з традиційними свинцево-кислотними батареями;
  - легші та мають менший вплив на навколишнє середовище порівняно зі свинцево-кислотними акумуляторами.

Недоліки:

- дорожчі та мають нижчу щільність енергії порівняно з іншими літій-іонними акумуляторами;
- можуть бути більш чутливими до перезарядження та недозарядження порівняно з іншими типами акумуляторів [25].

Для сонячної енергетичної системи зазвичай добре підходять AGM- або GEL-батареї, оскільки вони відомі своїм тривалим терміном служби, хорошою стійкістю до глибоких циклів і високою стабільністю. Батареї LiFePO<sub>4</sub> також є хорошим варіантом, оскільки вони пропонують підвищену безпеку порівняно з іншими літій-іонними батареями, мають довший термін служби і вищу толерантність до глибокого розряду порівняно з традиційними свинцево-кислотними батареями. Вони також легші і мають менший вплив на навколишнє середовище порівняно зі свинцево-кислотними акумуляторами. Літій-іонні акумулятори, хоча і широко використовуються в портативній електроніці та електромобілях, зазвичай менш придатні для домашніх сонячних енергетичних систем через їх високу вартість і чутливість до високих температур. Виходячи з вищеприписаного, було прийнято рішення використовувати в системі автономних сонячних генераторів саме GEL акумулятори, через їх високу надійність і великий термін служби. Літій-залізо-фосфатні акумулятори хоч і мають довший термін служби (8-10 років проти 6-7 років у GEL) так коштують в середньому в 3-4 рази більше, тому вони були виключені, як невиправдано дорогий варіант у порівнянні з GEL акумуляторами.

---

## 2.5 Висновки до розділу 2

Під час роботи над другим розділом магістерської роботи було описано принципи роботи основних компонентів апаратного комплексу системи автономних сонячних генераторів:

- сонячної панелі;
- інвертора;
- реле;

Було доведено, що клімат України добре підходить для сонячної енергетики та обрано тип інвертору саме з чистої синусоїдою, задля довгої роботи без шкоди побутовій техніці. Також було обрано саме безконтактний вид реле за більший термін експлуатації та відсутність додаткового шуму.

Крім цього, було описані основні типи акумуляторів: AGM (Absorbent Glass Mat), GEL, Li-Ion, LiFePo<sub>4</sub>. Було обґрунтовано використання саме гелевих акумуляторів через їх високу надійність, довгий термін експлуатації, можливість використання у жиллому приміщенні і при цьому не занадто високу ціну.

## РОЗДІЛ 3 АПАРАТНО-ПРОГРАМНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ СИСТЕМИ

### 3.1 Підбір компонентів апаратного комплексу

Перш за все, необхідно визначитися з технічним завданням до системи, а саме з кількістю споживаної електроенергії. Навантаження, що споживає приватний будинок можна умовно поділити на постійне та не постійне. До постійного навантаження можна віднести:

- холодильник: 280 Вт;
- кондиціонер: 400 Вт;
- роутер: 20 Вт;
- телевізор: 100 Вт;
- комп'ютер: 200 Вт;
- освітлення: 500 Вт.

В сумі під постійне навантаження в даному випадку слід зарезервувати 1500 Вт.

Крім цього, в будинку є електроприбори, які можна вмикати по черзі, а саме:

- пральна машина: 1500 Вт;
- електричний чайник: 1500 Вт;
- посудомийна машина: 1500 Вт;
- пилосос: 1000 Вт;
- мікрохвильова піч: 1000 Вт;
- праска: 1000 Вт;
- фен: 1000 Вт;
- електрична м'ясорубка: 500 Вт.

Так як ці електричні пристрої не будуть використовуватись одночасно, було прийнято рішення зарезервувати під ці потреби 2500 Вт. В сумі виходить, що енергосистема має мати потужність 4 кВт.

З цього впливають технічні вимоги до певних компонентів:

- сумарна потужність сонячних панелей 8 кВт (вдвічі більша, за потужність енергосистеми, так як сонячні панелі не можуть працювати в темну частину доби, в цей час буде використовуватись енергія з акумуляторів, тому частина енергії з сонячних панелей має йти на зарядку акумуляторів);

- сумарна потужність інверторів: 8 кВт (виходячи з того, що акумулятори будуть використовувати окремі інвертори);

- Сумарні ємність акумуляторів: 48 кВт\*год (4000 А\*год при 12 В напрузі).

### 3.1.1 Підбір мікрокомп'ютеру

Мікрокомп'ютер - це повноцінний комп'ютер невеликого розміру і потужності. Мікрокомп'ютери використовують один інтегрований напівпровідниковий чіп для центрального процесора. Вони також містять пам'ять у вигляді пам'яті ROM і оперативної пам'яті (RAM), порти вводу/виводу (I/O), а також шину або систему з'єднувальних проводів, і все це розміщено в одному блоці [26].

Серед основних мікрокомп'ютерів можна виділити Raspberry Pi, Orange Pi та Banana Pi.

Raspberry Pi - найпопулярніший і найвідоміший з трьох. Він має велику спільноту та численні варіанти програмного забезпечення. Raspberry Pi пропонує хороший баланс продуктивності та доступності, що робить його чудовим вибором як для початківців, так і для досвідчених користувачів. Raspberry Pi 4 Model B 8GB RAM має такі характеристики:

- процесор: Broadcom BCM2711, чотирьохядерний Cortex-A72 (ARM v8) 64-біт SoC частотою 1.5 ГГц;

- графічний процесор: VideoCore VI;

---

– виходи: гігабітний Ethernet, бездротовий зв'язок IEEE 802.11ac 2,4 ГГц і 5,0 ГГц, Bluetooth 5.0, BLE, 2 порти USB 3.0, 2 порти USB 2.0, 2 порти micro-HDMI [27].

Orange Pi є більш дешевою альтернативою Raspberry Pi, але зі слабшим процесором і меншим об'ємом пам'яті. Однак він пропонує додаткові функції, такі як Wi-Fi і 3G, що робить його гарним вибором для проектів, які потребують бездротового підключення. Orange Pi 4GB RAM має такі характеристики:

- процесор: Allwinner H616, Quad-core Cortex-A53 (ARM v8) 64-bit SoC частотою 1.5GHz;
- графічний процесор: Mali-G31 MP2;
- виходи: гігабітний Ethernet, Wi-Fi, Bluetooth, USB 3.0, USB 2.0, HDMI, Audio Jack [28].

Banana Pi схожий на Orange Pi, але з більш потужним процесором і більшим обсягом пам'яті. Він також має ширший асортимент доступних аксесуарів, що робить його кращим вибором для більш вимогливих проектів. Banana Pi Pi 4GB RAM має такі характеристики:

- процесор: Allwinner R18 Cortex-A53 (ARM v8) 64-біт SoC частотою 1.8 ГГц;
- графічний процесор: PowerVR SGX531;
- виходи: гігабітний Ethernet, Wi-Fi, Bluetooth, USB 3.0, USB 2.0, HDMI, Audio Jack [29].

Виходячи з вищеописаного, через більшу популярність та кращі характеристики було прийнято рішення використати в якості мікрокомп'ютеру Raspberry Pi 4 Model B 8GB.

### 3.1.2 Підбір сонячних панелей

Як було описано вище, для розрахованої системи, необхідна сумарна потужність сонячних панелей 8 кВт. При цьому, для децентралізації треба використовувати як можна більшу кількість панелей меншої потужності

зادля надійності системи. При збільшенні кількості панелей меншої потужності може зростати сумарна ціна системи, тому задача знайти золоту середину. В рамках магістерської роботи було розглянено 3 сонячні панелі:

- Altek ALM-50M;
- Perlight PLM-150M;
- Аxioma Energy AX-200M.

Altek ALM-50M – це монокристалічна сонячна панель потужністю 50 Вт, вона має ККД 15.96%, площу 670×540 мм, вагу 4.5 кг, складається з 36 модулів. Номінальна напруга – 12 В, ціна 70\$ [30].

Зовнішній вигляд цієї сонячної панелі зображено на рис. 3.1.



Рисунок 3.1 - Altek ALM-50M.

Це означає, що для описаної системи необхідно  $8000 / 50 = 160$  таких модулів. При цьому ціна складе  $70 \times 160 = 11200$  \$. Одна панель займає  $670 \times 540 = 361800$  мм<sup>2</sup> або 0.3618 м<sup>2</sup>. Тобто для усієї системи необхідна площа  $0.3618 \times 160 = 57.888$  м<sup>2</sup>.

Perlight PLM-150M – це монокристалічна сонячна панель від виробника Perlight потужністю 150 Вт, вона має ККД 15.4%, площу 1482×676 мм, вагу 11.5 кг, складається з 36 модулів. Номінальна напруга – 12 В, ціна 118\$ [31].

Зовнішній вигляд цієї сонячної панелі зображено на рис. 3.2.



Рисунок 3.2 - Perlite PLM-150M.

Це означає, що для описаної системи необхідно  $8000 / 150 = 54$  таких модулів. При цьому ціна складе  $118 \times 54 = 6372$  \$. Одна панель займає  $1482 \times 676 = 1001832$  мм<sup>2</sup> або 1.001832 м<sup>2</sup>. Тобто для усієї системи необхідна площа  $1.001832 \times 54 = 54$  м<sup>2</sup>.

Axioma Energy AX-200M – це монокристалічна сонячна панель потужністю 200 Вт, вона має площу 1560×700 мм, вагу 12.8 кг, складається з 36 модулів. Номінальна напруга – 12 В, ціна 160\$ [32].

Зовнішній вигляд цієї сонячної панелі зображено на рис. 3.3.



---

### Рисунок 3.3 - Ахіома Energy AX-200M.

Це означає, що для описаної системи необхідно  $8000 / 200 = 40$  таких модулів. При цьому ціна складе  $40 \times 160 = 6400\$$ . Одна панель займає  $1560 \times 700 = 1092000 \text{ мм}^2$  або  $1.092 \text{ м}^2$ . Тобто для усієї системи необхідна площа  $1.092 \times 40 = 43.68 \text{ м}^2$ .

Зважаючи на вищесказана через найменшу ціну і площу зайнятої поверхні, було обрано рішення використати 54 сонячних панелей Perlight PLM-150M. 54 панелі – достатня для децентралізації кількість.

#### 3.1.3 Підбір інверторів

Як було описано в першому розділі, інвертор обов'язково має видавати чисту синусоїду. Крім цього, кількість інверторів задає кількість автономних сонячних генераторів. З описаного вище в цьому розділі, необхідна сумарна потужність інверторів – 8 кВт. При цьому для децентралізації їх має бути як можна більше, але при цьому ціна повинна бути не занадто високою.

В процесі виконання магістерської роботи було розглянуто такі інвертори:

- Luxeon IPS-600S;
- INV-1200W;
- NP1500-1500W.

Luxeon IPS-600S – автономний сонячний інвертор має правильну синусоїду на виході з частотою 50/60 Гц. ККД пристрою 85-90%. Номінальна потужність: 300 Вт. Вхідна напруга: 12 В. Інвертор працює при температурі  $0 - 40 \text{ }^\circ\text{C}$  та має рівень захисту IP21. Ціна – 58\$ [33]. На рис 3.4 зображено зовнішній вигляд цього інвертора.





Рисунок 3.4 - Luxeon IPS-600S.

Отже для системи необхідно  $8000 / 300 = 27$  таких інверторів на загальну суму  $58 \times 27 = 1566\$$ .

INV-1200W – автономний інвертор має правильну синусоїду на виході з частотою 50/60 Гц. ККД пристрою 88-92%. Номінальна потужність: 1200 Вт, при піковій 2400 Вт. Вхідна напруга: 12 В. Інвертор оснащений запобіжником на 40 А. Ціна – 250\$ [34]. На рис 3.6 зображено зовнішній вигляд цього інвертора.



Рисунок 3.5 - Luxeon IPS-600S.

Отже для системи необхідно  $8000 / 1200 = 7$  таких інверторів на загальну суму  $1200 \times 6 = 1750$  \$.

NP1500-1500W – автономний інвертор має правильну синусоїду на виході з частотою 50/60 Гц. ККД пристрою 90%. Номінальна потужність: 500 Вт, при піковій 3000 Вт. Вхідна напруга: 10 - 15 В. Ціна – 200\$ [35]. На рис 3.6 зображено зовнішній вигляд NP1500-1500W.



Рисунок 3.6 - NP1500-1500W.

Отже для системи необхідно  $8000 / 1500 = 6$  таких інверторів на загальну суму  $200 \times 6 = 1200$ \$.

Враховуючи вищеописане було прийнято рішення використати 6 інверторів NP1500-1500W, через меншу ціну, в порівнянні з іншими варіантами і при цьому 6 інверторів – досить велика кількість, що забезпечить велику надійність системи.

#### 3.1.4 Підбір акумуляторів

Як було описано в першому розділі, в системі автономних сонячних генераторів для накопичення електроенергії було прийнято рішення використовувати GEL акумулятори. Крім того, як було описано вище в цьому розділі, сумарний заряд акумуляторів має бути 4000 А\*год.

В ході виконання магістерської роботи були розглянуті такі акумулятори:

- Axioma Energy AX-GEL-200 12V 200Ah;
- Tensite AGM 12V 100Ah;
- Ritar RA12 260Ah/10HR.

Гелевий акумулятор Axioma Energy AX-200 12V 200Ah є надійним акумулятором на 200 А\*год і напругою 12 В. Такий акумулятор має термін експлуатації в 10-12 років та витримує до 1900 циклів заряду-розряду. Він здатний працювати при температурі від -20 °С до +60 °С. Характеризується розміром 522×240×219 мм<sup>2</sup> і вагою 56 кг. Ціна акумулятора – 490 \$ [36]. Зовнішній вигляд акумулятора зображено на рис. 3.7.



Рисунок 3.7. - Axioma Energy AX-200 12V 200Ah.

Отже, для покриття потреби системи необхідно  $4000 / 200 = 20$  шт., вартістю  $20 \times 490 = 9800\$$ .

Гелевий акумулятор Tensite AGM 12V 100Ah є високоякісним акумулятором на 100 А\*год і напругою 12 В. Такий акумулятор також має термін експлуатації в 10-12 років. Він витримує до 350 циклів заряду-розряду, що значно менше, ніж попередній варіант. Він здатний працювати при температурі від -20 °С до +50 °С. Характеризується розміром 329×172×225

мм<sup>2</sup> і вагою 27 кг. Ціна акумулятора – 240 \$ [37]. Зовнішній вигляд акумулятора зображено на рис. 3.8.



Рисунок 3.8. - Tensite AGM 12V 100Ah.

Отже, для покриття потреби системи необхідно  $4000 / 100 = 40$  шт., вартістю  $40 \times 240 = 9600$ \$.

Гелевий акумулятор Ritar RA12 260Ah/10HR є високоякісним акумулятором на 260 А\*год і напругою 12 В. Він витримує до 400 циклів. Він здатний працювати при температурі від -20 °С до +60 °С. Характеризується розміром 535×279×260 мм<sup>2</sup> і вагою 72 кг. Ціна акумулятора – 780 \$ [38]. Зовнішній вигляд акумулятора зображено на рис. 3.9.



Рисунок 3.9. - Ritar RA12 260Ah/10HR.

Отже, для покриття потреби системи необхідно  $4000 / 260 = 16$  шт., вартістю  $16 \times 780 = 12480\$$ .

Зважаючи на вищеописане, було прийнято рішення використовувати 20 акумуляторів Ахіома Energy AX-200 12V 200Ah через невелику в порівнянні з іншими варіантами ціну і набагато більшу кількість циклів розряду-заряду, у порівнянні з конкурентами.

### 3.1.5 Підбір реле

Як було обґрунтовано в 2 розділі, при створенні системи автономних сонячних генераторів необхідно використовувати твердотільне реле через його більшу надійність, так як основною перевагою використання автономних сонячних генераторів і є висока надійність. Так як в системі планується потужність сонячних панелей на кожному генераторі в 1200 Вт, реле, для комутації змінного струму повинні бути розраховані мінімум на  $1200 / 220 = 6$  А, а для комутації постійного струму  $1200 / 12 = 100$  А. У ході виконання магістерської роботи для реле змінного струму було розглянуто такі реле:

- реле твердотільне SSR-100DA;
- модуль потужного реле 5B 30A з опторозв'язкою.

Реле твердотільне SSR-100DA є сучасним твердотільним реле, що дозволяє керувати великим (100 А) струмом змінного струму. При навантаженні більше 2кВт необхідно використовувати радіатор.

Характеристики:

- максимальна сила комутуючого струму, А: 100;
- діапазон напруги керуючого струму, В: 3-32;
- діапазон сили керуючого струму, мА: 3-25;
- час на вмикання чи вимикання реле, мс : 10;
- опір ізоляції, МОм: 500;
- діапазон температури експлуатації, °С: -30 до +75;
- індикація: за допомогою світодіоду;
- тип монтажу: гвинтами [39].

Зовнішній вигляд цього реле зображено на рис. 3.10.



Рисунок 3.10. - Реле твердотільне SSR-100DA.

Розпіновку цього реле зображено на рис 3.11.

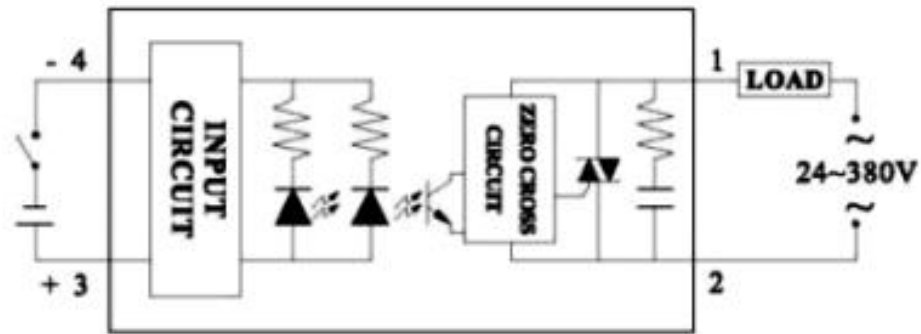


Рисунок 3.11 – контакти реле SSR-60DA.

До контактів 1 і 2 підключається комутуюче навантаження змінного струму, до контактів 3 і 4 підключається керуючий сигнал (+ та - відповідно).

Модуль потужного реле 5В 30А з опторозв'язкою – це реле з можливістю зміни полярності керуючого сигналу. Він дозволяє комутувати струм до 30А. Він потребує напругу керуючого сигналу від 2.5 В до 5 В. Зовнішній вигляд реле зображено на рис. 3.12.

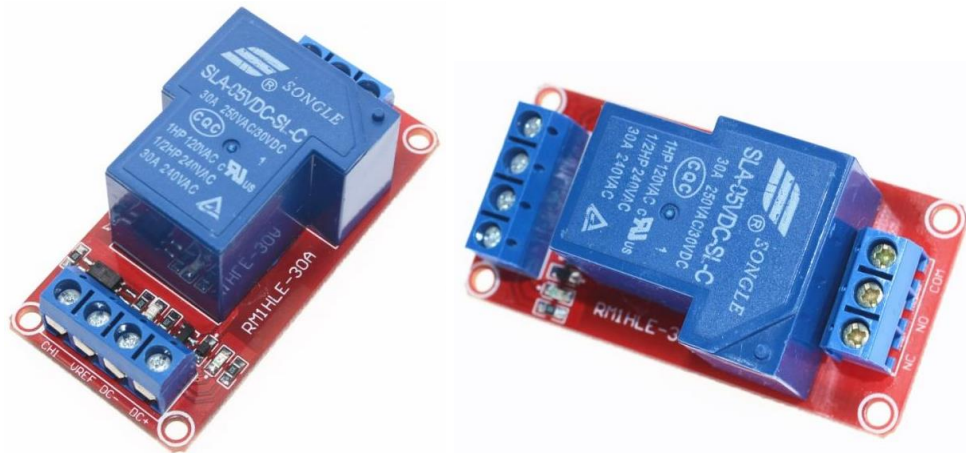


Рисунок 3.12. - модуль потужного реле 5В 30А з опторозв'язкою.

У реле є 4 керуючі контакти:

- CH1: контакт керування полярністю керуючого сигналу;
- VREF: контакт керуючого сигналу;
- DC –: контакт негативного джерела живлення;
- DC +: контакт позитивного джерела живлення.

Та 3 контакти комутуючого навантаження:

- NC (normally close);

- NO (normally open);
- COM (common terminal respectively) [40].

Завжди використовується контакт COM, а NC чи NO використовується в залежності від сигналу на керуючому контакті CN1. Схематично це зображено на рис. 3.13.

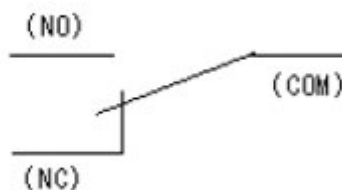


Рисунок 3.13. – схема контактів комутуючого навантаження.

Виходячи з наведених даних про характеристики реле, було прийнято рішення використати для комутації змінного струму реле SSR-100DA через те, що в системі таких реле буде певна кількість і ці реле вимагають меншої кількості використаних пінів для керування. Крім цього, його можна використовувати і для комутації прямого струму.

### 3.1.6 Підбір датчиків напруги

Датчик напруги в кожному сонячному генераторі розташовано до інвертування напруги, тому він має вимірювати напругу до 25В. В ході виконання магістерської роботи було розглянуто такі датчики напруги:

- INA219;
- Voltage Sensor Dc0-25v.

INA219 призначено для вимірювання таких сили струму та напруги у мережі постійного струму. Він здатний вимірювати напругу до 26В. Має роздільну здатність в 12 біт при швидкості інтерфейсу 3.4 МГц. Зовнішній вигляд та контакти модулю зображено на рис. 3.14.



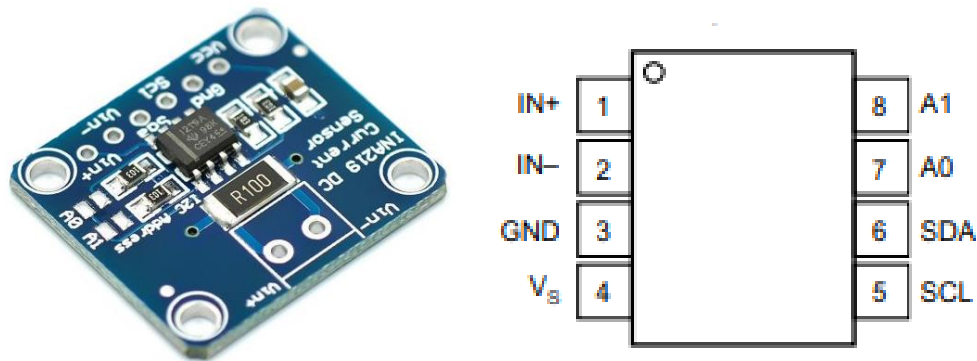


Рисунок 3.14. – модуль датчика INA219.

Модуль має такі контакти:

- IN+: позитивний контакт струму, що вимірюється;
- IN-: негативний контакт струму, що вимірюється;
- GND: заземлення;
- V<sub>s</sub>: джерело живлення, від 3 до 5,5 В;
- SCL: лінія тактової частоти послідовної шини;
- SDA: лінія даних послідовної шини;
- A0: адресний контакт;
- A1: адресний контакт [41].

Датчик напруги Voltage Sensor Dc0-25v. працює за принципом резистивного дільника, завдяки чому вхідна напруга інтерфейсної клеми зменшується в 5 разів. Так як напруга Raspberry Pi 4 до 5 В, тоді вхідна напруга модуля виявлення напруги не може бути більшою 25 В. Зовнішній вигляд датчику зображено на рис. 3.15.

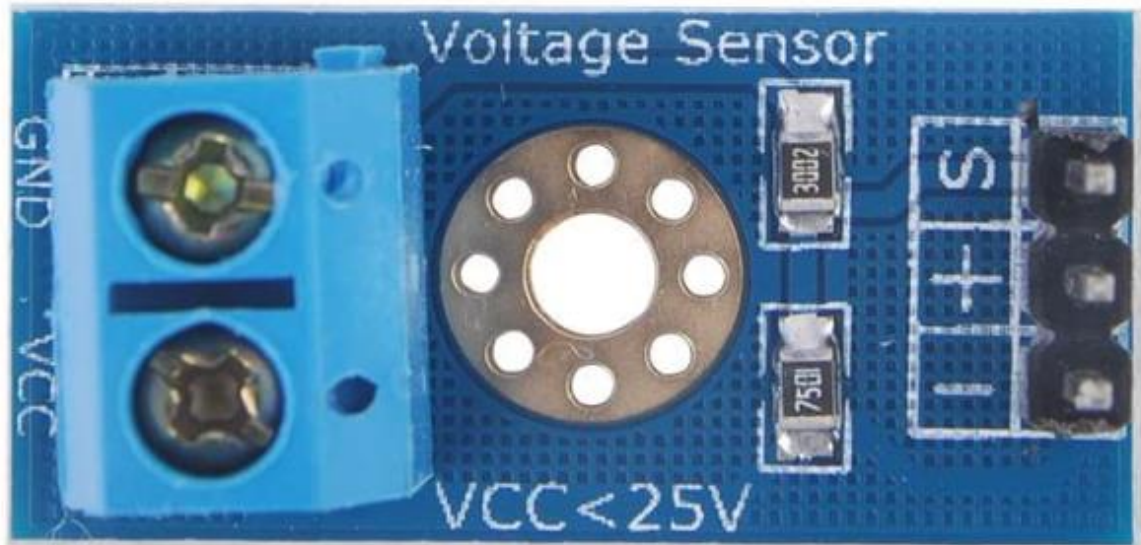


Рисунок 3.15 - Модуль датчик напруги Voltage Sensor Dc0-25v.

Датчик має такі контакти:

- GND: негативний контакт струму, що вимірюється;
- VCC: позитивний контакт струму, що вимірюється;
- S: контакт, з якого зчитуються данні;
- +: позитивний контакт живлення 5 В;
- -: негативний контакт живлення 5 В [42].

Для системи автономних сонячних генераторів підходять обидва датчики, та враховуючи меншу ціну і розмір було обрано використовувати датчики Voltage Sensor Dc0-25v.

### 3.2 Побудова структурної, принципової та макетної схеми

Враховуючи вищесказане, можна зробити висновок, що система має складатись з таких компонентів:

- одноплатний комп'ютер Raspberry Pi 4 Model B 8GB RAM;
- 54 сонячних панелей Perlight PLM-150M;
- 6 інверторів NP1500-1500W;
- 20 акумуляторів Ахіома Energy AX-200 12V 200Ah;
- реле SSR-60DA;

– датчиків Voltage sensor.

Виходячи з цього, враховуючи, що в темну частину доби сонячні панелі не генерують електроенергію, то 3 інвертора має бути задіяно в акумуляторному генераторі. Згідно з цим, структурна схема мережі автономних сонячних генераторів має бути такою:

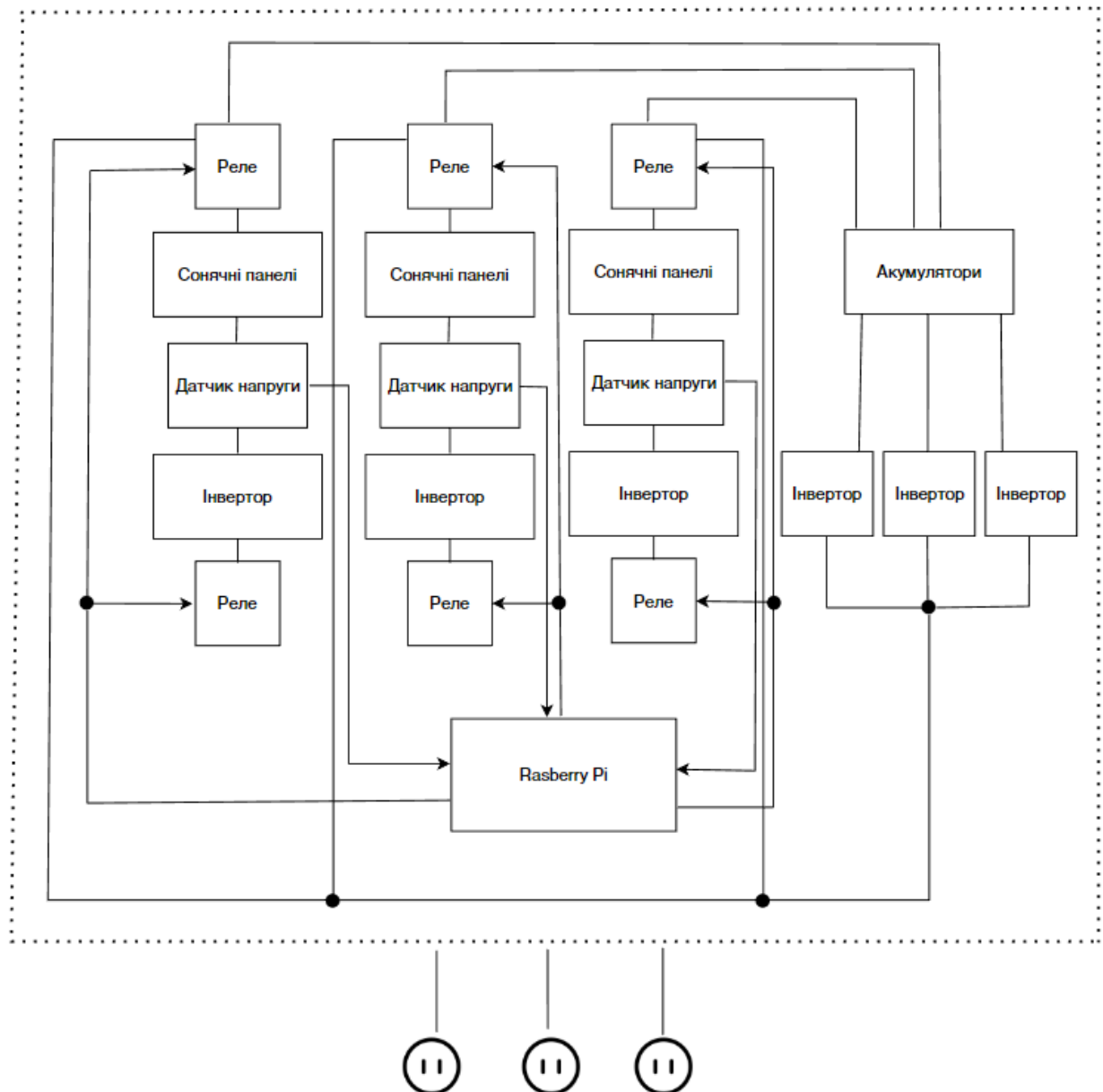


Рисунок 3.16 – Структурна схема мережі автономних сонячних генераторів.

Як видно на рис. 3.16 Raspberry Pi зчитує дані з датчиків з кожного сонячного генератора і відповідно до цього приймає рішення про увімкнення

чи вимкнення конкретного генератора. Одночасно вмикаються чи вимикаються 2 реле: той, що пускає струм на навантаження (змінний струм) і той, що подає струм для заряду акумуляторів (постійний струм). Це досягається під'єднанням керуючих контактів реле до одного контакту в Raspberry Pi.

Акумуляторний генератор складається з акумуляторів під'єднаних паралельно та інверторів під'єднаних паралельно. Вибір використання 3 інверторів, під'єднаних паралельно зумовлено збільшенням надійності, в порівнянні з 1 інвертором більшої потужності. Крім того, система має використовувати однакові інвертори для синхронізації полуперіодів. Сумарна потужність інверторів на сонячних генераторів рівна сумарній потужності інверторів на акумуляторному генераторі.

Відповідно до створеної блок-схеми було розроблено макетну схему. Її зображено на рис. 3.17.

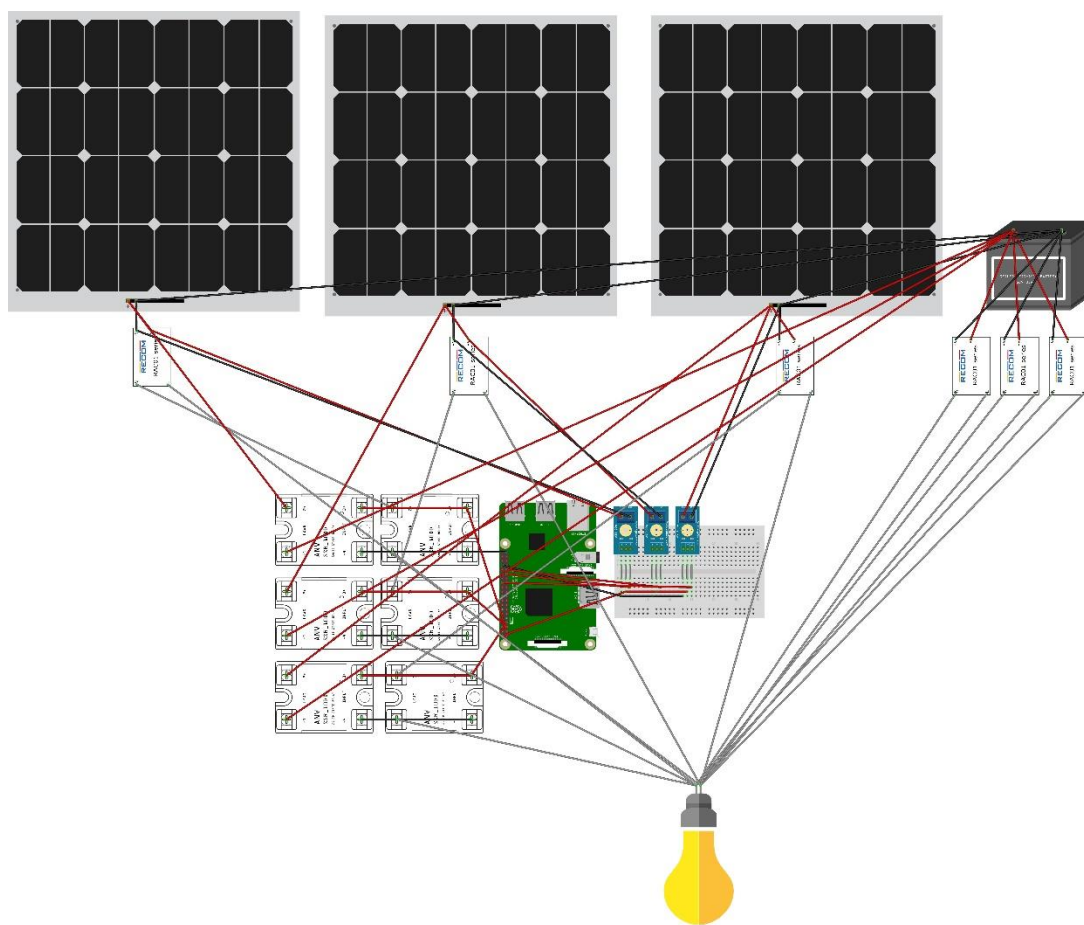


Рисунок 3.17 – макетна схема мережі сонячних автономних панелей

На рисунку є певні умовності. Так, батареї сонячних панелей на генераторах зображені як 1 сонячна панель, а якості навантаження зображена лампа розжарення. Відповідно до макетної схеми було стеноеровано принципову схему. Її зображено на рис 3.18.

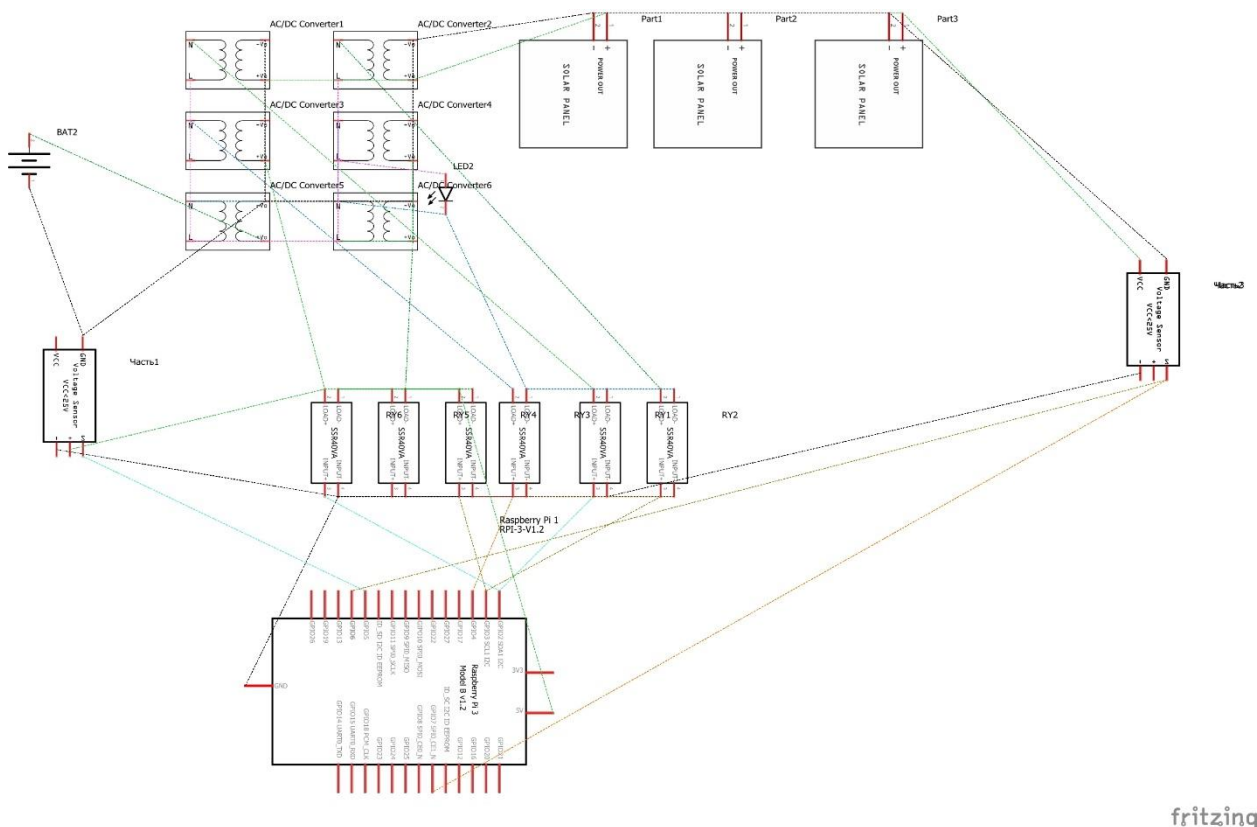


Рисунок 3.18 – принципова схема системи автономних сонячних генераторів

До принципової схеми було застосована ті ж самі умовності, що і до макетної схеми.

### 3.3 Вибір мови програмування та середовища розробки

#### 3.3.1 Вибір мови програмування

Raspberry Pi можна програмувати різними мовами програмування. В процесі виконання магістерської роботи було розглянуто 3 мови програмування:

– Python - це мова високого рівня з безліччю бібліотек для роботи з GPIO та іншими периферійними пристроями. Перевагами є простота і зручність використання, а також безліч ресурсів і документації для розробників, величезний вибір бібліотек для вирішення всіляких завдань, включно з роботою з GPIO, велика спільнота користувачів, які підтримуються безліччю документації та ресурсів. Недолік: деякі завдання можуть бути вирішені швидше з використанням більш низькорівневих мов [43].

– C/C++ - це низькорівнева мова, придатна для розв'язання складніших завдань. Перевагою є швидке виконання коду і можливість отримання доступу до низькорівневих ресурсів пристрою. Недолік: складний синтаксис і складність налагодження коду [44].

– Java - мова, яку можна використовувати для розробки прошивки на Raspberry Pi 4. Перевагами є платформонезалежність, широка підтримка різних бібліотек і фреймворків, безпека, завдяки якій можна уникнути багатьох вразливостей, типових для інших мов [45].

Виходячи з вищесказаного, було прийнято рішення використовувати для розробки програмного забезпечення магістерської роботи мову програмування Python, в першу чергу через велику кількість бібліотек та високої популярності мови саме в контексті розробки для Raspberry Pi.

### 3.3.2 Вибір середовища розробки

Для розробки Python на Raspberry Pi 4 можна використовувати різні Integrated Development Environments (IDEs), зокрема:

IDLE: IDLE (Integrated Development and Learning Environment) є вбудованою IDE для Python, що постачається разом із Python. IDLE пропонує простий інтерфейс для написання та запуску коду Python. Він пропонує можливість налагодження, підсвічування синтаксису та автодоповнення. Одним із недоліків IDLE є відсутність додаткових функцій, таких як підтримка версіонування або робота з віддаленими файлами [46].

Thonny: Thonny - це легка і проста у використанні IDE для Python, яка спеціально розроблена для навчання програмуванню. Thonny пропонує простий інтерфейс для написання коду, а також можливість виконувати інтерактивні операції у вікні інтерпретатора. Він також підтримує налагодження та аналіз коду. Одним із недоліків Thonny є відсутність деяких додаткових функцій, які можуть бути використані для навчання коду. які можна знайти в більш просунутих IDE, таких як підтримка версіонування або інтеграція із системою контролю версій [47].

PyCharm: PyCharm - це потужна IDE для Python, яка пропонує широкий набір функцій для розробки ПЗ. PyCharm пропонує підсвічування синтаксису, інтелектуальну підказку, а також можливість налагодження та аналізу коду. Він також підтримує версіонування та інтеграцію з системами контролю версій [48].

Для виконання магістерської роботи було прийнято рішення використати IDE PyCharm через великий функціонал та інтегрованість з Git-ом.

### 3.4 Опис використаних функцій

Принцип роботи програмної частини системи автономних сонячних генераторів полягає в тому, щоб зчитувати дані про напругу з кожного сонячного генератора і, якщо напруга більше 10 В – вмикати реле цього генератора, якщо менше 10 В – вимикати його. Лістинг коду наведено в Додатку А.

В коді використовуються такі бібліотеки:

- `time` – бібліотека для додавання затримки в коді;
- `RPi.GPIO` – бібліотека для керування GPIO виходами Raspberry Pi.

В коді використовується функція `time.sleep(1)` з бібліотеки `RPi.GPIO`, для затримки в 1 секунду, щоб програма могла стабільно працювати в нескінченному циклі.

---

В програмній частині магістерської роботи використані такі функції з бібліотеки `time RPi.GPIO` (імпортована як `GPIO`):

- `GPIO.setmode(GPIO.BCM)`: Ця функція встановлює режим нумерації для виводів вводу/виводу загального призначення (`GPIO`) на Raspberry Pi. У цьому випадку використовується режим нумерації `BCM` (`Broadcom SOC channel`), який посилається на номер `GPIO`, що використовується процесором `Broadcom` на Raspberry Pi;

- `GPIO.setwarnings(False)`: функція вимикає попереджувальні повідомлення, які генеруються бібліотекою `GPIO`;

- `GPIO.setup(pin, mode)`: функція ініціалізує вказаний вивід як вхід або вихід. Аргумент `mode` визначає напрямок виводу і може приймати два значення: `GPIO.IN` для входу або `GPIO.OUT` для виходу;

- `GPIO.input(pin)`: функція зчитує значення вказаного виводу (у нашому випадку з датчика напруги) і повертає його як `GPIO.HIGH` (1) або `GPIO.LOW` (0);

- `GPIO.output(pin, value)`: Ця функція встановлює вказаний вивід у значення `GPIO.HIGH` (1) або `GPIO.LOW` (0) залежно від аргументу `value`. Використовується для увімкнення і вимкнення реле.

Кожен сонячний генератор – об'єкт класу `SolarGenerator`. Цей клас має такі методи:

- `__init__(self, sensor_pin, relay_pin)`: конструктор, приймає 2 параметри: номер пін датчика напруги, номер пін реле;

- `read_sensor(self)`: повертає напругу з датчику у вольтах;

- `turn_relay_on(self)`: вмикає реле;

- `turn_relay_off(self)`: вимикає реле.

Приклад створення об'єкту класу `SolarGenerator`: `SolarGenerator(5, 2)` задає генератору пін датчика 5 і пін реле 2.



Після створення масиву з 3 SolarGenerator програма щосекунди перевіряє напругу на кожному датчику і вимикає датчик при напрузі менше 10 В і вмикає при напрузі більше 10 В.

### **3.5 Висновки до розділу 3**

В процесі виконання третього розділу магістерської роботи були проведені розрахунки для забезпечення електроживлення приватного будинку на 4кВт. Для цього було розроблено систему з чотирьох генераторів: трьох сонячних та акумуляторних. Кожен із сонячних генераторів складається з 18-ти сонячних панелей Perlight PLM-150M, інвертору NP1500-1500W, датчику напруги Voltage sensor, та двох реле SSR-60DA. Акумуляторний генератор складається з 20 акумуляторів Ахіома Energy AX-200 12V 200Ah підключених паралельно та 3 інверторів. В якості мікрокомп'ютера обрано Raspberry Pi 4 Model B 8GB.

Крім цього, було розроблено блок-схему системи, макетну та принципову схеми. Було обґрунтовано вибір мови програмування Python та IDE PyCharm, описано алгоритм роботи коду і описано використані функції. Після створення масиву з 3 SolarGenerator програма щосекунди перевіряє напругу на кожному датчику і вимикає датчик при напрузі менше 10 В і вмикає при напрузі більше 10 В.

## РОЗДІЛ 4 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ

### 4.1 Порівняння розробленої системи з існуючими рішеннями та пошук шляхів покращення системи

Розроблена система автономних сонячних генераторів має такі характеристики:

- номінальна потужність: 4кВт;
- пікова потужність: 8кВт (при максимальній потужності, знятій з сонячних генераторів і одночасно зняті максимальної потужності з акумуляторного генератору);
- енергія акумуляторів: 48кВт\*год;
- площа сонячних панелей: 54 м<sup>2</sup>;
- кількість інверторів: 8.

Всі ці характеристики були описані в третьому розділі. Крім цього, необхідно розрахувати ціну системи. Для цього треба сумувати ціни її компонентів:

- мікрокомп'ютер: ціна Raspberry Pi 4 Model B 8GB 75\$ [49];
- акумулятори: 9800\$ (описано в третьому розділі);
- сонячні панелі: 6372\$ (описано в третьому розділі);
- інвертори: 1200\$;
- реле: 66\$ (6 штук по 11\$) [39];
- датчики напруги: 9\$ (3 штуки по 3\$) [42].

Отже, загальна ціна розробленої системи:

$$75 + 9800 + 6372 + 1200 + 66 + 9 = 17522 (\$)$$

Для порівняння з системою, розробленою в ході виконання магістерської роботи було обрано існуюче рішення зі такою ж номінальною потужністю (4кВт) - гібридна сонячна електростанція на 4 кВт від українського виробника sun-energy.

Його основні характеристики:

- тип: гібридна;
- номінальна потужність: 4кВт;
- пікова потужність: 8кВт;
- кількість фаз: 1;
- площа сонячних панелей: 25 м<sup>2</sup>;
- кількість панелей: 15;
- гарантія на панелі: 25 років;
- гарантія на акумулятор: 2 роки;
- потужність кожної панелі: 285 Вт;
- кількість акумуляторів: 4;
- енергія акумуляторів: 9.6 кВт\*год;
- час автономної роботи: 2 год;
- ціна: 5400\$;

Для детального аналізу було розглянуто систему покомпонентно. Ці дані представлено у табл. 4. 1 [50].

Таблиця 4.1. – компоненти гібридної сонячної електростанції на 4 кВт.

| Компонент                                   | Модель  | Кількість | Ціна за одиницю | Сума   |
|---|---|-----------|-----------------|--------|
| Інвертор                                    | AXIOMA energy - ISGRID 4000                                     | 1 шт.     | 1120\$          | 1120\$ |
| Акумулятори                                 | LogicPower LPM - GL 200 AH                                      | 4 шт.     | 450\$           | 1800\$ |
| Сонячні панелі                              | Risen Energy RSM40-8-400M                                       | 10 шт.    | 154\$           | 1540\$ |
| Система кріплень                            | Рейки, шпилька, болти та гайки                                  | 10 шт.    | 24\$            | 240\$  |
| Фурнітура                                   | Кабелі з подвійною ізоляцією, набір конекторів MC4, запобіжники | 1 шт.     | 300\$           | 300\$  |
| Робота спеціалістів по встановленню системи | Встановлення усієї системи спеціалістами.                       | 1 шт.     | 400\$           | 400\$  |
| Всього                                      |   |           |                 | 5400\$ |

Так як існуюча система має значно меншу ємність акумуляторів ніж розроблена в процесі виконання магістерської роботи (9.6 кВт\*год проти 48 кВт\*год), то було прийнято рішення для більш ефективного порівняння додати в існуючу систему акумулятори, щоб зробити ємність однаковою. Так, існуюча система має 4 акумулятори по 200 А\*год ціною 450\$ за одиницю. Отже, 1 акумулятор здатний накопичувати енергію  $200 \times 12 = 2400$  Вт\*год. Тоді для накопичення енергії в 48 кВт необхідно  $48000 / 2400 = 20$  шт. сумарною ціною  $450 \times 20 = 9000$ \$. Згідно з цим, ціна такої системи становить вже не 5400\$, а 12600\$.

Отже, виходячи з основних характеристик:

- система розроблена в процесі виконання МР є дорожчою за існуючу систему (17522\$ проти 12600\$ - дорожча на 39%);
- система розроблена в процесі виконання МР має пікове навантаження вдвічі більше за номінальне, на відміну від існуючого рішення;
- система розроблена в процесі виконання МР займає більшу площу, ніж існуюча система (54 м<sup>2</sup> проти 25 м<sup>2</sup> – площа більша на 116%);
- система розроблена в процесі виконання МР є більш надійною за існуючу систему (6 інверторів проти 1 інвертора в існуючій системі, якщо взяти вірогідність повного виходу з системи за ладу існуючого рішення за  $x$ , то вірогідність виходу усіх інверторів системи автономних сонячних генераторів  $x^6$ . При  $x=0.01$ ,  $x^6 = 1e^{-12}$ . Крім цього, вихід одного інвертору з ладу в існуючій системі призведе до зменшення потужності системи на 100%, то в розробленій системі 33% в одному з режимів роботи (акумуляторному чи від сонячних панелей) відповідно до того, який інвертор вийде з ладу). Відповідно до цього, розроблена система має значно більший прогнозований час експлуатації.

Для виявлення причин недоліків розробленої системи автономних сонячних генераторів перед існуючими рішеннями, а саме більша площа

---

сонячних панелей та більша вартість системи, було порівняно основні компоненти системи автономних сонячних генераторів з компонентами існуючої системи:

Стосовно використання акумуляторів, підходи системи автономних сонячних генераторів та існуючих систем сонячного електроживлення з централізованою архітектурою не мають принципових відмінностей. Крім того, використання 20 акумуляторів Axioma Energy AX-200 12V 200Ah загальною вартістю в 9800\$ не суттєво відрізняється від 20 акумуляторів LogicPower LPM - GL 200 AH загальною вартістю в 9000\$. Крім цього, якщо взяти той факт, що роздрібна ціна останнього акумулятору не 450\$, як в гібридна сонячна електростанція при оптовій закупівлі, а 640\$ [50], то загальна вартість не 9000\$, а  $640 \times 20 = 12800$ \$. Отже, в розроблений системі автономних сонячних генераторів було обрано оптимальне рішення по використанню типу, ємності та кількості акумуляторів.

Використання інверторів в системі автономних сонячних генераторів має певні відмінності від класичних систем. В першу чергу це використання не одного інвертору, а кількості, вдвічі більшої за кількість автономних сонячних генераторів та те, що сумарна потужність має бути вдвічі більша ніж номінальна потужність системи. Це викликано тим, що в такій системі акумулятори використовують окремі інвертори, а не ті ж самі, що сонячні панелі. Система, яку було розроблено в процесі виконання МР містить 6 інверторів NP1500-1500W загальною вартістю в 1200\$, існуюча система використовує 1 інвертор AXIOMA energy - ISGRID 4000 ціною 1120\$. Враховуючи більш ніж вдвічі більшу максимальну сумарну потужність вибір інверторів в розробленій системі є цілком виправданим.

Використання сонячних панелей в системі автономних сонячних панелей потребує мати кількість сонячних панелей кратну кількості сонячних генераторів (в системі, що розроблено в процесі виконання МР - 3). Крім того, враховуючи, що основна перевага розробленої системи – надійність,

сонячні панелі мають бути підключені паралельно (при послідовному підключенні при виході з ладу одного з елементів – весь ланцюг стає не придатним до роботи).

Система, яку було розроблено в процесі виконання МР, містить 54 сонячні панелі Perlight PLM-150M загальною вартістю 6372\$ та площею 54 м<sup>2</sup> в той час як гібридна сонячна електростанція на 4 кВт від sun-energy містить 10 сонячних панелей Risen Energy RSM40-8-400M загальною вартістю в 1540\$ та площею 25 м<sup>2</sup>. Тобто, загальна вартість сонячних панелей в розробленій системі більша за існуюче рішення на 313%, а необхідна площа на 116%. Це досить суттєво. Порівняння основних характеристик сонячних панелей Perlight PLM-150M та Risen Energy RSM40-8-400M наведено в табл 4.2

Таблиця 4.2 – порівняння Perlight PLM-150M та Risen Energy RSM40-8-400M

| Характеристика                                  | Perlight PLM-150M | Risen Energy RSM40-8-400M |
|---|-------------------|---------------------------|
| Тип фотомодуля                                  | монокристал       | монокристал               |
| Кількість струмознімних доріжок                 | 3                 | 9                         |
| Потужність, Вт                                  | 150               | 400                       |
| Напруга при максимальній потужності, В          | 18.3              | 34.39                     |
| Струм при максимальній потужності, А            | 8.2               | 11.64                     |
| ККД, %  | 15.4              | 20.8                      |
| Кількість фотоелементів                         | 36                | 36                        |
| Площа сонячної панелі                           | 1.001832          | 1.922384                  |
| Вага  | 11.5              | 21                        |
| Робоча температура, °C                          | від -40 до +85    | від -45 до +85            |
| Ціна, \$  | 118               | 160                       |
| Кількість панелей для сумарної потужності 4 кВт | 54                | 10                        |

Як видно в табл. 4.1 основною перевагою Risen Energy RSM40-8-400M перед Perlight PLM-150M є значно кращий ККД (20.8% проти 15.4%) – це й

дає таку велику різницю в сумарній площі та ціні. Однак, в рамках використання у мережі автономних сонячних генераторів недоліками таких панелей є більша потужність однієї панелі (нівелюється паралельним підключенням) та велика максимальна напруга в 34.39%. У разі використання таких чи подібних сонячних панелей у мережі автономних сонячних генераторів система має використовувати стабілізатори при підключенні до акумуляторів (34.39 В занадто велика напруга для 12 В акумуляторів) та при підключенні до 12 В інверторів, або використовувати інвертори, розраховані на більшу напругу. Це ускладнило б систему та додало б в неї нові елементи, але скоріше за все знизило б сумарну вартість системи. Відповідно до цього було побудовано блок-схему системи автономних сонячних панелей зі стабілізаторами напруги. Її зображено на рис. 4.1

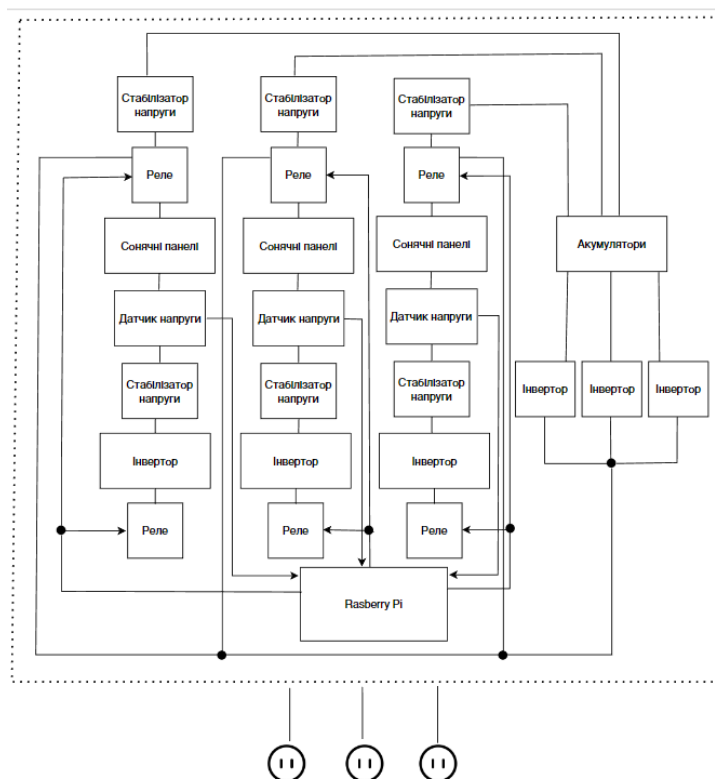


Рисунок 4.1 – блок-схема системи автономних сонячних генераторів зі стабілізаторами напруги.

Як видно на рис. 4.1, блок-схема автономних системи автономних сонячних генераторів зі стабілізаторами напруги є модифікацією блок-схеми, що була створена і описана в третьому розділі МР. В якості стабілізатора можна використати Cllena DC 24V Step Down to 12V 100A 1200W DC/DC.

Його зовнішній вигляд зображено на рис. 4.2:



Рисунок 4.2. – Стабілізатор напруги Cllena DC 24V Step Down to 12V 100A 1200W DC/DC.

Технічні характеристики:

- діапазон вхідної напруги: 18-35 В постійного струму;
- вихідна напруга: DC12V 100A;
- вихідна номінальна потужність: 1200 Вт;
- ККД: 97% (половинне навантаження); 95% (повне навантаження);
- струм холостого ходу: <math><0.1\text{V}</math>;
- пульсації: 200mVp;
- регулювання лінії:  $\pm 0.2\%$ ;
- регулювання навантаження:  $\pm 0.2\%$ ;
- точність напруги:  $\pm 1.5\%$ ;
- корпуси: IP68;



- 
- робоча температура корпусу:  $-40 \sim 85^{\circ}\text{C}$ ;
  - вага: 2200 г;
  - ціна: 100\$;
  - литий алюмінієвий корпус, заливка епоксидною смолою, охолодження за рахунок вільної конвекції повітря;
  - водонепроникність рівня IP68 та протиударний захист;
  - захист: Від перевантаження по струму, перенапруги, перегріву, перевантаження і короткого замикання, автоматичне відновлення після повернення пристрою до нормального режиму роботи;
  - сертифікати: CE/RoHS, 1 рік гарантії, термін служби до 100 000 годин [52].

Такий стабілізатор може доповнити розроблену систему автономних сонячних генераторів і дасть змогу замінити сонячні панелі Perlight PLM-150M на 12 (більше 10, щоб можна було порівну розділити між трьома сонячними генераторами) сонячних панелей Risen Energy RSM40-8-400M. Сумарна вартість сонячних панелей:  $12 \times 160 = 1920\text{\$}$ , сумарна вартість стабілізаторів напруги:  $6 \times 100 = 600\text{\$}$ . Тоді сумарна вартість системи автономних сонячних генераторів: 13670\$. Це на 8.5% дорожче за існуюче рішення, але така система має вдвічі більшу пікову потужність і є значно надійнішою.

Отже, було виявлено 2 недоліки реалізованої системи: висока вартість та велика площа сонячних панелей. Причиною є низький ККД сонячних панелей на 12 В. Було запропоновано рішення цієї проблеми використанням сонячних панелей розрахованих на більшу напругу, та додаванням в систему стабілізаторів напруги. Система автономних сонячних панелей все-одно є трохи дорожчою за рахунок того, що система має додаткові елементи: мікрокомп'ютер, реле, датчики, стабілізатори напруги. Крім цього, сумарна потужність інверторів в такій системі має бути вдвічі більшою за номінальну. При цьому система є значно надійнішою.

## 4.2 Порівняння надійності та ціни системи при різній кількості генераторів

Надійність системи автономних сонячних генераторів залежить, в першу чергу від кількості генераторів. Кількість генераторів визначається кількістю інверторів. Відповідно до цього було проаналізовано зміну надійності та ціни при зміні кількості інверторів в системі.

Було порівняно такі інвертори для забезпечення потужності в 8кВт:

- інвертор перетворювач напруги Power Inverter 12-220V, 2000W чиста синусоїда (1);
- автономний інвертор 12/220 Luxeon IPS-600S (2);
- інвертор foval 2200w, перетворювач напруги 12-220 чиста синусоїда (правильна) (3);
- інвертор перетворювач напруги 12-220 В 1500W чиста синусоїда (4);
- перетворювач напругу з 12 на 220 вольтів інвертор Bodasan 12V-220V 500W (5).

Їхні характеристики вказано в табл. 4.3, при цьому замість назви інвертора вказано номер зі списку вище.

Таблиця 4.3 – основні характеристики порівняних інверторів [53 - 57].

| Характеристика        | 1     | 2     | 3     | 4     | 5     |
|-----------------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Потужність, Вт        | 2000  | 300   | 1100  | 1500  | 500   |
| Кількість для 8кВт    | 4     | 27    | 8     | 6     | 16    |
| Ціна за одиницю, \$   | 88    | 58    | 86    | 88    | 38    |
| Вартість для 8кВт, \$ | 352   | 1566  | 688   | 528   | 609   |
| Гарантія, міс         | 12    | 60    | 12    | 12    | 12    |
| Вид синусоїди         | чиста | чиста | чиста | чиста | чиста |
| ККД, %                | >90   | 85-90 | >90   | >90   | >90   |

Згідно до цих даних було побудовано діаграму зміни вартості інверторів для покриття потреби в 8 кВт. Цей графік зображено на рис. 4.3

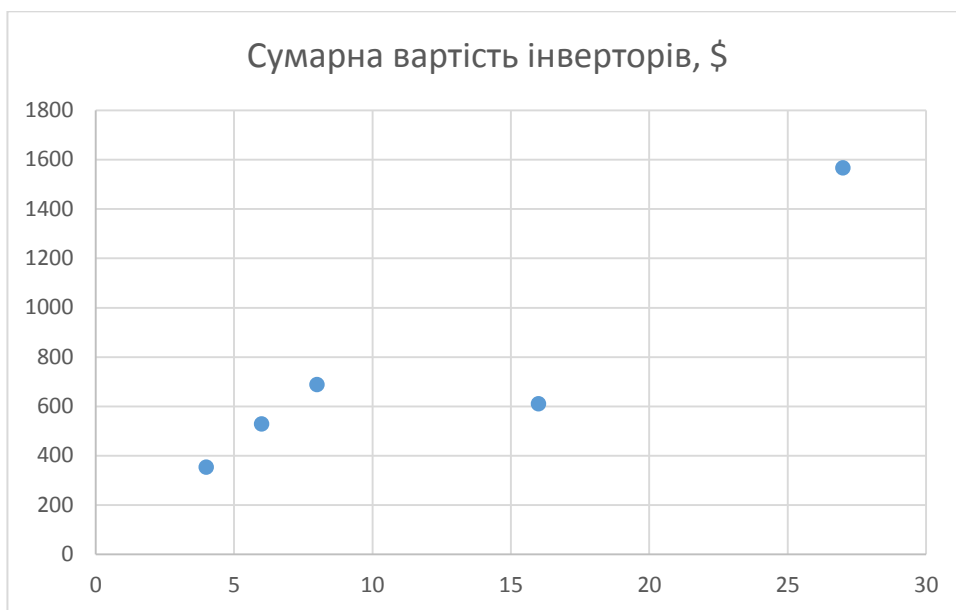


Рисунок 4.3 – Діаграма зміни вартості інверторів для покриття потреби в 8кВт різною кількістю інверторів.

Вірогідність виходу з ладу одного інвертору в конкретний день можна розрахувати за формулою:

$$P_1 = \frac{1}{MTBF \times 30} \times 100,$$

де  $P_1$  – вірогідність виходу з ладу 1-ого інвертора в конкретний день (%);  
 $MTBF$  – прогнозований час безвідмовної роботи інвертора (міс.).

Прогнозований час безвідмовної роботи інвертора не є загальнодоступним і відомим для кожної моделі, тому було прийнято рішення приблизно оцінити його відповідно до гарантійного терміну. Вірогідність відмови інвертора (а відповідно і сонячного генератора) протягом гарантійного терміну взято за 10-100%. Більшість описаних інверторів має гарантійний термін в 12 місяців, окрім інвертору 2, що має гарантійний термін в 60 місяців. Відповідно до цього було розраховано  $P_{1min}$  та для інверторів 1, 3, 4, 5:

$$P_{1min} = \frac{1}{12 \times 10 \times 30} \times 100 = 0.278 (\%)$$

Та  $P_{1max}$ :

$$P_{1max} = \frac{1}{12 \times 30} \times 100 = 2.78 (\%)$$

А для інвертора 2 з гарантією 60 місяців  $P_{1min}$ :

$$P_{1min} = \frac{1}{60 \times 10 \times 30} \times 100 = 0.0056 (\%)$$

Та  $P_{1max}$ :

$$P_{1max} = \frac{1}{60 \times 30} \times 100 = 0.056 (\%)$$

Вірогідність виходу з ладу усіх інверторів можна розрахувати за формулою:

$$P = \left(\frac{P_1}{100}\right)^n \times 100,$$

де  $P$  – вірогідність виходу всіх інверторів в конкретний день (%);

$P_1$  – вірогідність виходу з ладу 1-ого інвертора в конкретний день (%);

$n$  – кількість інверторів в системі;

Відповідно до цього було розраховано вірогідність виходу з ладу в конкретний день усієї системи побудованої на певній кількості інверторів

( $P_{(1)min}$ ,  $P_{(2)min}$ ,  $P_{(3)min}$ ,  $P_{(4)min}$ ,  $P_{(5)min}$ ):

$$P_{(1)min} = \left(\frac{0.278}{100}\right)^4 \times 100 = 5.97e^{-9}$$

$$P_{(2)min} = \left(\frac{0.0056}{100}\right)^{27} \times 100 = 1.58e^{-113}$$

$$P_{(3)min} = \left(\frac{0.278}{100}\right)^8 \times 100 = 3.56e^{-19}$$

$$P_{(4)min} = \left(\frac{0.278}{100}\right)^6 \times 100 = 4.61e^{-14}$$

$$P_{(5)min} = \left(\frac{0.278}{100}\right)^{16} \times 100 = 1.27e^{-39}$$

Відповідні

максимальні

вірогідності

$(P_{(1)max}, P_{(2)max}, P_{(3)max}, P_{(4)max}, P_{(5)max})$ :

$$P_{(1)min} = \left(\frac{2.78}{100}\right)^4 \times 100 = 0.00005972816$$

$$P_{(2)min} = \left(\frac{0.056}{100}\right)^{27} \times 100 = 1.58e^{-86}$$

$$P_{(3)min} = \left(\frac{2.78}{100}\right)^8 \times 100 = 3.56e^{-19}$$

$$P_{(4)min} = \left(\frac{2.78}{100}\right)^6 \times 100 = 4.61e^{-8}$$

$$P_{(5)min} = \left(\frac{2.78}{100}\right)^{16} \times 100 = 1.27e^{-23}$$

Для наглядності ці дані були зображені в табл. 4.4.

Таблиця 4.4. – залежність надійності системи і ціни від кількості інверторів

| Кількість інверторів в системі | Вартість | Мінімальна вірогідність виходу системи з ладу в конкретний день | Максимальна вірогідність виходу системи з ладу в конкретний день |
|--------------------------------|----------|---|--|
| 4                              | 352      | $5.97e^{-9}$  | 0.00005972816  |
| 27                             | 1566     | $1.58e^{-113}$  | $1.58e^{-86}$  |
| 8                              | 688      | $3.56e^{-19}$   | $3.56e^{-19}$  |
| 6                              | 528      | $4.61e^{-14}$   | $4.61e^{-8}$   |
| 16                             | 609      | $1.27e^{-39}$   | $1.27e^{-23}$  |

Отже, при рості кількості інверторів (а значить і кількості сонячних генераторів) в системі автономних сонячних генераторів вартість системи росте значно повільніше ніж падає вірогідність повної відмови системи або росте її надійність. Це означає, що такі системи мають мати якнайбільше інверторів та мати як можна більшу кількість сонячних генераторів.

---

## Висновки до розділу 4

В четвертому розділі магістерської роботи було порівняно систему, що було описано в третьому розділі з існуючою системою такою ж номінальною потужністю та виявлено такі недоліки та переваги розробленої системи:

- більша надійність;
- вдвічі більше пікове навантаження;
- система є значно дорожчою;
- система займає більшу площу.

Відповідно до цього, було запропоновано модифікацію розробленої системи для зменшення вартості системи і зайнятої площі а саме заміна сонячних панелей на 12 В панелями, що розраховано на напругу до 35 В та як наслідок додавання в систему стабілізаторів напруги. З такими модифікаціями розроблена система має вартість всього на 8% більшу за існуючу систему, але при цьому має значно більшу надійність.

Крім цього було проведено аналіз та пошук залежностей збільшення кількості інверторів у системі зі збільшенням ціни та надійності та зроблено висновки, що з ростом кількості інверторів у системі, її ціна росте значно повільніше ніж надійність.

---

## ВИСНОВКИ

У ході виконання МР було проаналізовано існуючі рішення автономного сонячного електроживлення та виявлено їхній основний недолік – низька надійність. При поломці чи пошкодженні одного елемента (інвертору) вся система виходить з ладу і не може функціонувати далі.

Було запропоноване рішення такої проблеми – використання автономних сонячних генераторів в кількості більше одного, що дає можливість системі продовжувати роботу. Був описаний термін «автономний сонячний генератор» і описано як має працювати така система.

Було описано принципи роботи основних компонентів апаратного комплексу системи автономних сонячних генераторів:

- сонячної панелі;
- інвертора;
- реле;

Були проведені розрахунки для забезпечення електроживлення приватного будинку на 4кВт. Для цього було розроблено систему з чотирьох генераторів: трьох сонячних та акумуляторних. Кожен із сонячних генераторів складається з 18-ти сонячних панелей Perlight PLM-150M, інвертору NP1500-1500W, датчику напруги Voltage sensor, та двох реле SSR-60DA. Акумуляторний генератор складається з 20 акумуляторів Ахіома Energy AX-200 12V 200Ah підключених паралельно та 3 інверторів. В якості мікрокомп'ютера обрано Raspberry Pi 4 Model B 8GB.

Крім цього, було розроблено блок-схему системи, макетну та принципову схеми. Було обґрунтовано вибір мови програмування Python та IDE PyCharm, описано алгоритм роботи коду і описано використані функції. Після створення масиву з 3 SolarGenerator програма щосекунди перевіряє напругу на кожному датчику і вимикає датчик при напрузі менше 10 В і вмикає при напрузі більше 10 В.

Було виявлено основний недолік такої системи – велика вартість та запропоновано модифікацію розробленої системи для зменшення вартості системи і зайнятої площі а саме заміна сонячних панелей на 12 В панелями, що розраховано на напругу до 35 В та як наслідок додавання в систему стабілізаторів напруги. З такими модифікаціями розроблена система має вартість всього на 8% більшу за існуючу систему, але при цьому має значно більшу надійність.



## ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Global Electricity Review 2022 | Ember. URL: <https://ember-climate.org/insights/research/global-electricity-review-2022/> (Last accessed: 5.12.2022).
2. Net Zero by 2050 – Analysis - IEA. URL: <https://www.iea.org/reports/net-zero-by-2050> (Last accessed: 5.12.2022).
3. How long before the world runs out of fossil fuels?. URL: <https://www.zmescience.com/science/news-science/how-long-fossil-fuels-last-43432/> (Last accessed: 30.01.2023).
4. What is a Load factor? Definition & Meaning and Calculation - Circuit GlobeTerabee. URL: <https://circuitglobe.com/load-factor.html> (Last accessed: 30.01.2023).
5. Стокроцький О. О., Пузирьов С. В. Балансування навантаження у мережі автономних сонячних генераторів. Могилянські читання – 2022 : тези доп. XXV Всеукр. наук.-метод. конф. Миколаїв, 7–11 листоп. 2022 р. Миколаїв : Чорном. нац. ун-т ім. Петра Могили, 2022. С. 96–98.
6. Автономна сонячна електростанція на 5 кВт ▷ купити на Sun-Energy.com.ua. URL: [https://sun-energy.com.ua/solar-power/solar-power-plants/avtonomna\\_5kw\\_10\\_rezerv](https://sun-energy.com.ua/solar-power/solar-power-plants/avtonomna_5kw_10_rezerv) (Last accessed: 30.01.2023).
7. Інвертор АХІОМА Energy ISMPPT BFP 5600 – низькі ціни, кредит, оплата частинами в інтернет-магазині ROZETKA | Купити в Україні: Києві, Харкові, Дніпрі, Одесі, Запоріжжі, Львові. URL: <https://rozetka.com.ua/ua/342498016/p342498016> (Last accessed: 30.01.2023).
8. ISMPPT BFP 5600. URL: [https://solar.biz.ua/ISMPPT\\_BFP\\_5600\\_ukr-min.pdf](https://solar.biz.ua/ISMPPT_BFP_5600_ukr-min.pdf) (Last accessed: 30.01.2023).
9. Сонячна панель Risen Energy RSM110-8-540M ▷ купити на Sun-Energy.com.ua. URL: <https://sun-energy.com.ua/solar-power/solar-panels/risen-rsm110-8-540%D0%BC> (Last accessed: 30.01.2023).

- 
10. What is a gel battery? URL: <https://sinovoltaics.com/learning-center/storage/gel-battery/> (Last accessed: 30.01.2023).
  11. Гелевий акумулятор LogicPower LP-GL200. URL: <https://sinovoltaics.com/learning-center/storage/gel-battery/> (Last accessed: 30.01.2023).
  12. Smart Grid Technology Working Operation and Applications. URL: <https://www.elprocus.com/overview-smart-grid-technology-operation-application-existing-power-system/> (Last accessed: 30.01.2023).
  13. Solar Cell: Working Principle & Construction (Diagrams Included) | Electrical4U. URL: <https://www.electrical4u.com/solar-cell/> / (Last accessed: 31.01.2023).
  14. Photoelectric effect (article) | Photons | Khan Academy. URL: <https://www.khanacademy.org/science/physics/quantum-physics/photons/a/photoelectric-effect> (Last accessed: 31.01.2023).
  15. Global Solar Atlas. URL: <https://globalsolaratlas.info/download/world> (Last accessed: 31.01.2023).
  16. Global Solar Atlas. URL: <https://globalsolaratlas.info/download/ukraine> (Last accessed: 31.01.2023).
  17. Solar Integration: Inverters and Grid Services Basics | Department of Energy. URL: <https://www.energy.gov/eere/solar/solar-integration-inverters-and-grid-services-basics>
  18. How to calculate output energy of PV solar systems?. URL: <https://photovoltaic-software.com/principle-ressources/how-calculate-solar-energy-power-pv-systems> (Last accessed: 31.01.2023).
  19. Power Inverters: What Are They & How Do They Work? | Electrical4U. URL: <https://www.electrical4u.com/power-inverter/> (Last accessed: 31.01.2023).
  20. How Electrical Relays Work - Circuit Basics| Electrical4U. URL: <https://www.circuitbasics.com/what-is-a-relay/> (Last accessed: 31.01.2023).

- 
21. What is an Electrical Relay? | OMRON Electronic Components - Asia Pacific. URL: <https://components.omron.com/sg-en/products/basic-knowledge/relays/basics> (Last accessed: 31.01.2023).
  22. BU-201a: Absorbent Glass Mat (AGM) - Battery University. URL: <https://batteryuniversity.com/article/bu-201a-absorbent-glass-mat-agm> (Last accessed: 1.02.2023).
  23. 12 things you need to know for gel battery - BRAVA. URL: <https://www.bravabatteries.com/gel-battery/> (Last accessed: 1.02.2023).
  24. Li-Ion Battery Advantages / Disadvantages: Lithium Ion » Electronics Notes. URL: [https://www.electronic-notes.com/articles/electronic\\_components/battery-technology/li-ion-lithium-ion-advantages-disadvantages.php](https://www.electronic-notes.com/articles/electronic_components/battery-technology/li-ion-lithium-ion-advantages-disadvantages.php) (Last accessed: 1.02.2023).
  25. What are LiFePO4 Batteries and their Advantages Over Lead-Acid. URL: <https://ecotreelithium.co.uk/news/what-are-lifepo4-batteries/> (Last accessed: 1.02.2023).
  26. Single Board Computers – What are they and how are they used? URL: <https://www.dsl-ltd.co.uk/what-are-single-board-computers-and-how-are-they-used/> (Last accessed: 2.02.2023).
  27. Raspberry Pi 4 Model B specifications – Raspberry Pi. URL: <https://www.raspberrypi.com/products/raspberry-pi-4-model-b/specifications/> (Last accessed: 2.02.2023).
  28. Orange Pi 4 LTS - orange pi 4 lts. URL: <http://www.orangepi.org/html/hardWare/computerAndMicrocontrollers/details/orange-pi-4-LTS.html> (Last accessed: 2.02.2023).
  29. Banana Pi BPI-M6 with Synaptics VS680 design ,onboard 4G LPDDR4 and 16G eMMC-Banana Pi open source hardware community,Single board computer, Router,IoT,STEM education. URL: <https://www.banana-pi.org/en/banana-pi-sbcs/141.html> (Last accessed: 2.02.2023).

- 
30. Сонячна панель Altek ALM-50M ▷ купити на Sun-Energy.com.ua. URL: <https://sun-energy.com.ua/solar-power/solar-panels/altekalm-50m> (Last accessed: 2.02.2023).
31. Сонячна панель Perlight PLM-150M - купити у Львові, Україна. URL: <https://sun-energy.com.ua/solar-power/solar-panels/perlight-plm-150m> (Last accessed: 2.02.2023).
32. Сонячна панель Ахіома Energy AX-200М (12 В) ▷ купити на Sun-Energy.com.ua. URL: <https://sun-energy.com.ua/solar-power/solar-panels/axioma-200m> (Last accessed: 2.02.2023).
33. Автономний інвертор 12/220 Luxeon IPS-600S - купити у Львові, Україна. URL: [https://sun-energy.com.ua/solar-power/solar-inverters/luxeon\\_ips-600s](https://sun-energy.com.ua/solar-power/solar-inverters/luxeon_ips-600s) (Last accessed: 2.02.2023).
34. Інвертор 12-220В з чистою синусоїдою 1200Вт/2400Вт (перетворювач напруги) AusHauz. URL: [https://aushauz.com.ua/uk/inverters/INV-1200W?gclid=Cj0KCQiA22eBhClARIsAGLQ2RkXaztQ6fZG\\_0iYZT1P\\_KnDdsbCw-b1iExC00lguhHi8aV5ALDP7tEaAvTTEALw\\_wcB](https://aushauz.com.ua/uk/inverters/INV-1200W?gclid=Cj0KCQiA22eBhClARIsAGLQ2RkXaztQ6fZG_0iYZT1P_KnDdsbCw-b1iExC00lguhHi8aV5ALDP7tEaAvTTEALw_wcB) (Last accessed: 2.02.2023).
35. Інвертор напруги NP1500-1500W чистий синус (00-00001126) – низькі ціни, кредит, оплата частинами в інтернет-магазині ROZETKA | Купити в Україні: Києві, Харкові, Дніпрі, Одесі, Запоріжжі, Львові. URL: [https://rozetka.com.ua/ua/slava-ukraini-00-00001126/p362948859/?gclid=Cj0KCQiA2-2eBhClARIsAGLQ2RlJXEVA9UNTRxNduBILdlJ4BONmSITWRULgrbjajzOv7G4glVf7QW0aAIOXEALw\\_wcB](https://rozetka.com.ua/ua/slava-ukraini-00-00001126/p362948859/?gclid=Cj0KCQiA2-2eBhClARIsAGLQ2RlJXEVA9UNTRxNduBILdlJ4BONmSITWRULgrbjajzOv7G4glVf7QW0aAIOXEALw_wcB) (Last accessed: 2.02.2023).
36. Акумуляторна батарея Ахіома Energy AX-GEL-200 12V 200Ah▷ купити на Sun-Energy.com.ua. URL: <https://sun-energy.com.ua/solar-power/accumulator/ax-gel-200-12v-200-ah> (Last accessed: 2.02.2023).

- 
37. Акумуляторна батарея Tensite AGM 12V 100Ah ▷ купити на Sun-Energy.com.ua. URL: <https://sun-energy.com.ua/solar-power/accumulator/tensite-agm-12v-100> (Last accessed: 2.02.2023).
38. Акумуляторна батарея Ritar RA12 260Ah/10HR ▷ купити на Sun-Energy.com.ua. URL: [https://sun-energy.com.ua/solar-power/accumulator/ritar\\_560](https://sun-energy.com.ua/solar-power/accumulator/ritar_560) (Last accessed: 2.02.2023).
39. Реле твердотільне SSR-100DA, 1ф 100А, упр. 3-32 VDC купити в Києві та Україні. URL: <https://arduino.ua/prod1455-rele-tverdotelnoe-ssr-100da-1f-100a-upr-3-32-vdc> (Last accessed: 3.02.2023).
40. Модуль потужного реле 5В 30А з опторозв'язкою купити в Києві та Україні. URL: <https://arduino.ua/prod1767-1-channel-5v-30a-high-power-relay-module-for-arduino> (Last accessed: 3.02.2023).
41. <https://arduino.ua/prod1661-cifrovoi-datchik-toka-i-napryajeniya-na-ina219-s-shinoi-i2c>. URL: <https://arduino.ua/prod1661-cifrovoi-datchik-toka-i-napryajeniya-na-ina219-s-shinoi-i2c> (Last accessed: 3.02.2023).
42. Amazon.com: Diymall Voltage Sensor Dc0-25v for Arduino with Code(Pack of 2pcs) : Industrial & Scientific URL: <https://www.amazon.com/Diymall-Voltage-Sensor-Dc0-25v-Arduino/dp/B00NK4L97Q> (Last accessed: 3.02.2023).
43. Build Physical Projects With Python on the Raspberry Pi – Real Python. URL: <https://realpython.com/python-raspberry-pi/> (Last accessed: 7.02.2023).
44. Getting Started with C++ on Raspberry Pi (Guide & examples) – RaspberryTips. URL: <https://raspberrytips.com/use-c-on-raspberry-pi/> (Last accessed: 7.02.2023).
45. How to get started with Java on Raspberry Pi operating system. URL: <https://linuxhint.com/get-started-java-raspberry-pi/> (Last accessed: 7.02.2023).
46. IDLE — Python 3.11.1 documentation. URL: <https://docs.python.org/3/library/idle.html> (Last accessed: 7.02.2023).

- 
47. Thonny, Python IDE for beginners. URL: <https://thonny.org/> (Last accessed: 7.02.2023).
48. PyCharm: the Python IDE for Professional Developers by JetBrains. URL: <https://www.jetbrains.com/pycharm/> (Last accessed: 7.02.2023).
49. Raspberry Pi 4 Model B - 8GB RAM – Vilros.com. URL: <https://vilros.com/products/raspberry-pi-4-model-b-8gb-ram?src=raspberrypi> (Last accessed: 9.02.2023).
50. Гібридна сонячна електростанція на 4 кВт ▷ купити на Sun-Energy.com.ua. URL: <https://sun-energy.com.ua/solar-power/solar-power-plants/hybrid-4kwt> (Last accessed: 9.02.2023).
51. Акумулятор LogicPower LPM-GL 12V - 200 Ah за вигідною ціною від компанії ▷ Sun-Energy.com.ua. URL: <https://sun-energy.com.ua/solar-power/accumulator/lpm-gl12v-200ah> (Last accessed: 9.02.2023).
52. Cllena DC 24V Step Down to 12V 100A 1200W DC/DC Voltage Converter Regulator Waterproof Buck Transformer Power Supply : Amazon.ca: Electronics. URL: <https://www.amazon.ca/Cllena-Converter-Regulator-Waterproof-Transformer/dp/B07RGLDX61?th=1> (Last accessed: 10.02.2023).
53. Інвертор Перетворювач Напруги Power Inverter 12-220V, 2000W Чиста Синусоїда — Купити Недорого на Bigl.ua (1737077226). URL: [https://bigl.ua/ua/p1737077226-invertor-preobrazovatel-napryazheniya?click\\_track\\_data=.eJwlzskOgjAUQNF\\_eWtIWqYGdg440hhE4xRjsGAIQqulxCn-uxiXN3dz3nBVMmuYPhQZBJjYBBFiWZ4BLK2uacHFf7i2g5FIQC0bxXII4FjwEgzQ8pKLNtErRdq69c4bM6bKCx0\\_IJXfoXy-mNZ0Y0ancDaoToNVt1GPLdfkHj6yeKkTQdlyYY5SoYSL00u\\_XI9dGk-YFyc92xvCD6JzLtWzhdQQ7AjGyN9\\_vvijOmY.Jr-8SLyIc3vdmyAL0ixQRMB8BT8](https://bigl.ua/ua/p1737077226-invertor-preobrazovatel-napryazheniya?click_track_data=.eJwlzskOgjAUQNF_eWtIWqYGdg440hhE4xRjsGAIQqulxCn-uxiXN3dz3nBVMmuYPhQZBJjYBBFiWZ4BLK2uacHFf7i2g5FIQC0bxXII4FjwEgzQ8pKLNtErRdq69c4bM6bKCx0_IJXfoXy-mNZ0Y0ancDaoToNVt1GPLdfkHj6yeKkTQdlyYY5SoYSL00u_XI9dGk-YFyc92xvCD6JzLtWzhdQQ7AjGyN9_vvijOmY.Jr-8SLyIc3vdmyAL0ixQRMB8BT8) (Last accessed: 11.02.2023).

- 
54. Автономний інвертор 12/220 Luxeon IPS-600S - купити у Львові, Україна. URL: [https://sun-energy.com.ua/solar-power/solar-inverters/luxeon\\_ips-600s](https://sun-energy.com.ua/solar-power/solar-inverters/luxeon_ips-600s) (Last accessed: 11.02.2023).
55. Інвертор Foval 2200W, перетворювач напруги 12-220 Чиста Синусоїда (правильна) купити, ціни Львів, Київ, Україна. URL: <https://keramasvit.com.ua/invertor-12v-220-2200w-peretvoryuvach-naprugy-12v-220-v-chysta-synusoیدا-pravylna-2200-vt> (Last accessed: 11.02.2023).
56. Інвертор перетворювач напруги 12-220 В 1500W чиста синусоїда – низькі ціни, кредит, оплата частинами в інтернет-магазині ROZETKA | Купити в Україні: Києві, Харкові, Дніпрі, Одесі, Запоріжжі, Львові. URL: <https://rozetka.com.ua/ua/171015097/p171015097/> (Last accessed: 11.02.2023).
57. Перетворювач напругу з 12 на 220 вольтів інвертор Bodasan 12V-220V 500W – характеристики | ROZETKA. URL: <https://rozetka.com.ua/ua/360508662/p360508662/characteristics/> (Last accessed: 11.02.2023).

---

## ДОДАТОК А

### Лістинг коду

```
import RPi.GPIO as GPIO
import time

class SolarGenerator:
    def __init__(self, sensor_pin, relay_pin):
        self.sensor_pin = sensor_pin
        self.relay_pin = relay_pin
        GPIO.setup(self.sensor_pin, GPIO.IN)
        GPIO.setup(self.relay_pin, GPIO.OUT)

    def read_sensor(self):
        r1 = 30000.0
        r2 = 7500.0

        return (GPIO.input(self.sensor_pin) * 5) / 1024.0 / (r2/(r1+r2))

    def turn_relay_on(self):
        GPIO.output(self.relay_pin, GPIO.HIGH)

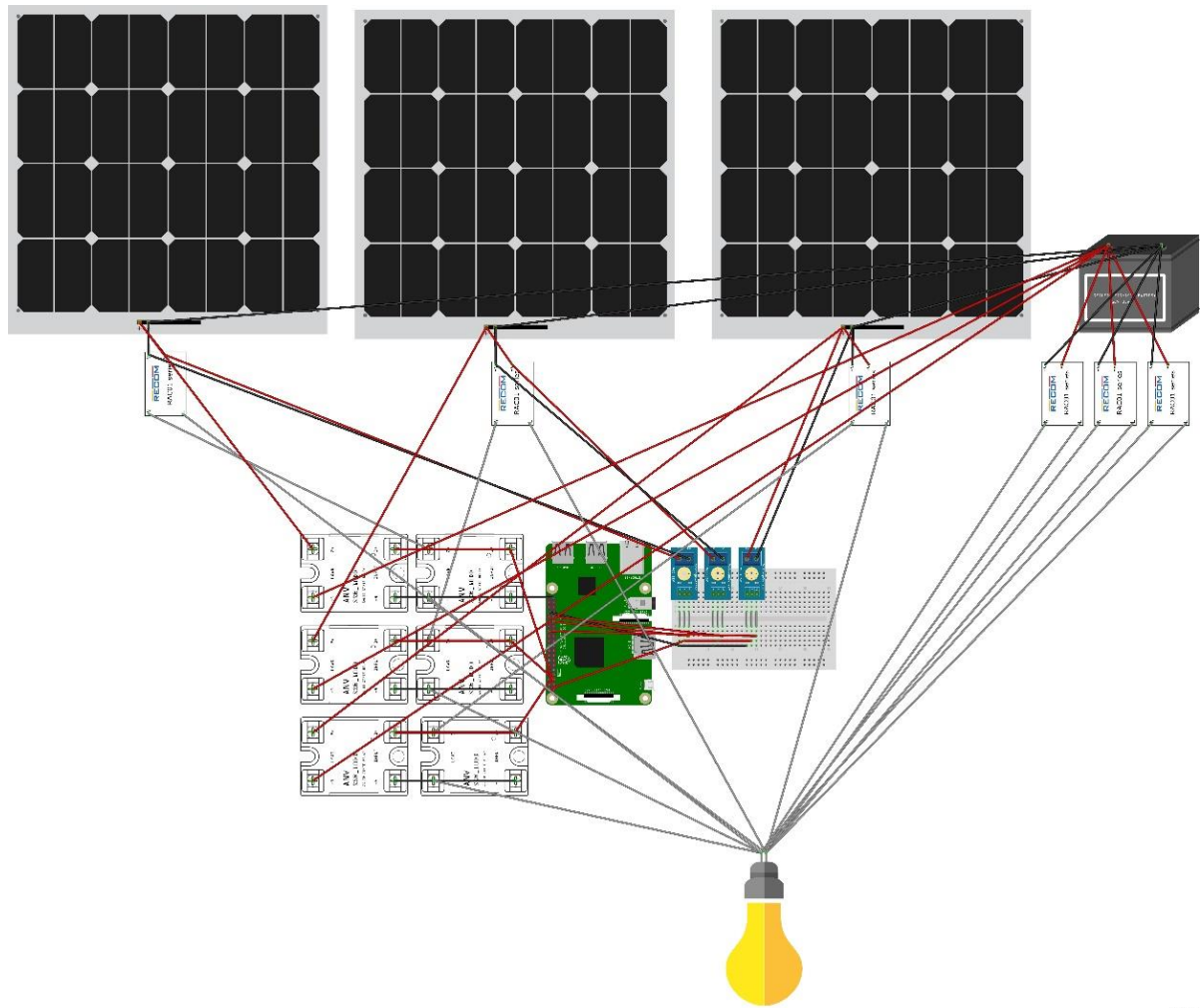
    def turn_relay_off(self):
        GPIO.output(self.relay_pin, GPIO.LOW)

MIN_VALUE = 10
GPIO.setmode(GPIO.BCM)
GPIO.setwarnings(False)
```



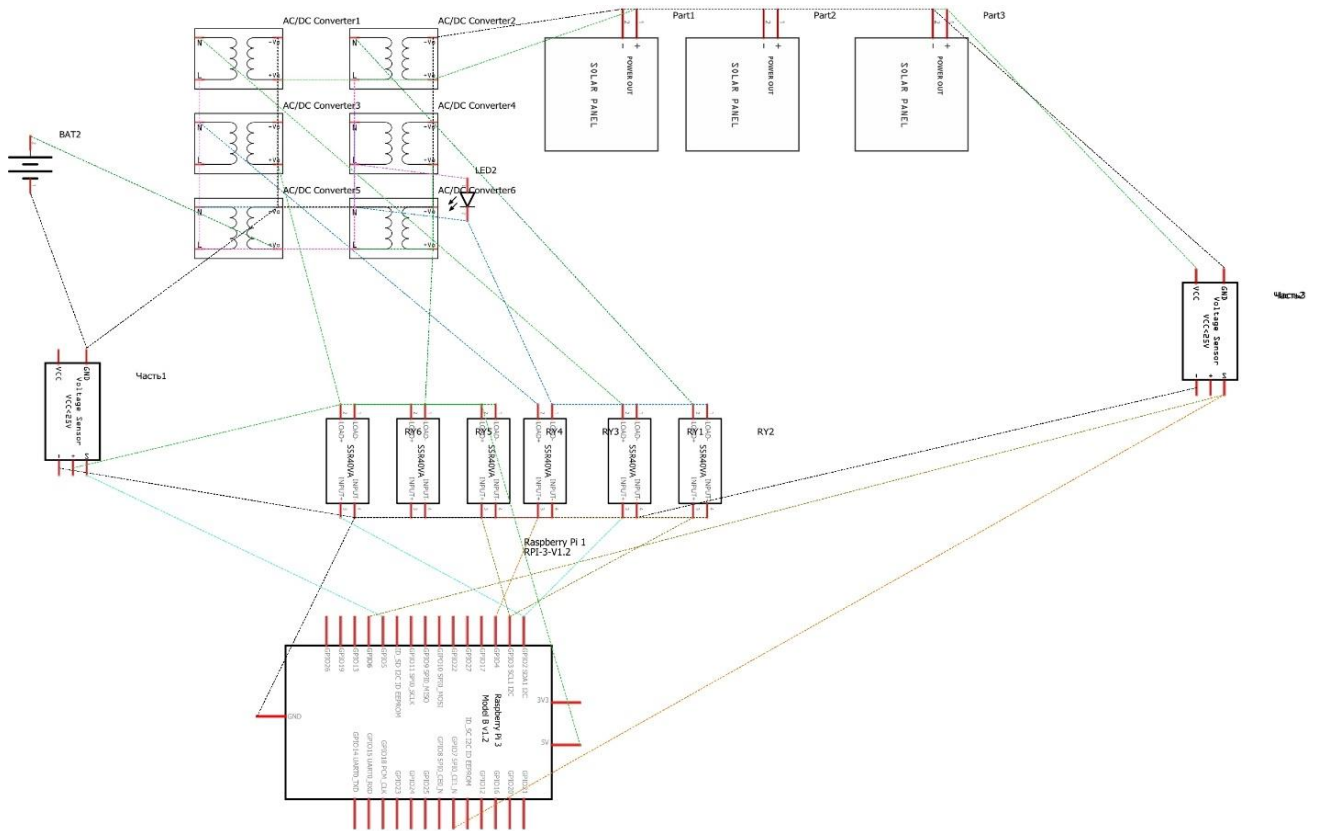
```
generators = [  
    SolarGenerator(5, 2),  
    SolarGenerator(6, 3),  
    SolarGenerator(7, 4)  
]  
  
while True:  
    for generator in generators:  
        generator_value = generator.read_sensor()  
        if generator_value > MIN_VALUE:  
            generator.turn_relay_on()  
        else:  
            generator.turn_relay_off()  
    time.sleep(1)
```

## ДОДАТОК Б Макетна схема



fritzing

## ДОДАТОК В Принципова схема



fritzing