

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
СУМСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
Факультет електроніки та інформаційних технологій

Кафедра електроніки,  
загальної та прикладної фізики

Кваліфікаційна робота магістра

**ЕЛЕКТРОННІ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ПЕРЕТВОРЮВАЧАМИ  
СОНЯЧНОЇ ЕНЕРГІЇ**

Магістрант гр. ЕПм-82

Ю. В. Калін

Науковий керівник  
канд. фіз.-мат. наук, доцент

Н. М. Опанасюк

Завідувач кафедри ЕЗПФ  
д-р фіз.-мат. наук, професор

І. Ю. Проценко

## РЕФЕРАТ

Мета кваліфікаційної роботи магістра полягає у розробці двовісного трекера для сонячної панелі, а також у дослідженні різниці вихідної потужності з використанням трекера та без нього.

У першому розділі роботи проведено огляд літературних джерел конструктивних особливостей, принципу роботи та застосування сонячних панелей.

У другому розділі було розроблено принципову схему та побудовано двовісний трекер для сонячної панелі.

У третьому розділі було проведено експеримент, у ході якого було отримано дані вихідної потужності сонячної панелі з використанням трекера та без нього.

Під час виконання роботи було використано мікроконтролер Arduino, годинник реального часу DS3231, акселерометр MPU-6050 GY-521, цифровий компас QMC5883L та сервоприводи SG90. Та був використаний метод програмування в середовищі Arduino.

У результаті проведених досліджень встановлено, що вихідна потужність сонячної панелі при використанні трекера збільшується на 20% у порівнянні зі статичною установкою.

Робота викладена на 38 сторінках, зокрема містить 18 рисунків, 7 таблиць, 2 додатки, список використаних джерел із 18 найменувань.

**КЛЮЧОВІ СЛОВА:** СОНЯЧНА БАТАРЕЯ, ТРЕКЕР, ВИХІДНА ПОТУЖНІСТЬ, СОНЯЧНЕ ВИПРОМІНЮВАННЯ, СОНЯЧНИЙ ЕЛЕМЕНТ.

## ЗМІСТ

	С.
<b>ВСТУП</b> .....	5
<b>РОЗДІЛ 1. ЗАГАЛЬНІ ПОНЯТТЯ ПРО СОНЯЧНУ ЕНЕРГІЮ</b> .....	6
1.1. Загальні відомості про сонячну енергетику.....	6
1.2. Принцип роботи сонячної панелі.....	7
1.3. Особливості та переваги трекера для сонячних електростанцій.....	13
1.4. Варіанти встановлення сонячних електростанцій на трекерах.....	15
<b>РОЗДІЛ 2. РОЗРОБКА СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ТРЕКЕРОМ</b> .....	17
2.1. Алгоритм роботи приладу.....	17
2.2. Розробка структурної схеми.....	19
2.3. Розробка функціональної схеми пристрою.....	20
2.4. Вибір елементної бази.....	22
<b>РОЗДІЛ 3. ДОСЛІДЖЕННЯ РОБОТИ СОНЯЧНОЇ ПАНЕЛІ</b> .....	28
3.1. Розрахунок потужності сонячної панелі без трекера.....	28
3.2. Розрахунок потужності сонячної панелі на сонячному трекері.....	29
<b>ВИСНОВКИ</b> .....	32
<b>СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ</b> .....	33
<b>ДОДАТКИ</b> .....	35
Додаток А.....	35
Додаток Б .....	37

## ВСТУП

Від яких параметрів залежить продуктивність сонячної панелі? Звісно, що від багатьох більш або менш важливих факторів, але основним параметром є орієнтування сонячної батареї на Сонце. Стаціонарно встановлена сонячна панель, повернута на полуденне сонце, виробляє максимальну кількість енергії опівдні, коли сонячне проміння падає перпендикулярно до поверхні панелі. А що ж відбувається в інший час? Виходячи з особливостей щоденної траєкторії руху сонця очевидно, що ефективний кут повороту панелей – орієнтовно  $150^\circ$ . Панель, яка встановлена стаціонарно в напрямку на південь по середині між точками заходу і сходу втрачає до 75% енергії від максимально можливої для вироблення в ранковий та вечірній час. Виходячи з цього, чим менший кут падіння променів відносно поверхні панелі, тим нижча її продуктивність. Також важливим є врахування географічних координат розташування сонячної електростанції, адже на півночі України оптимальний кут розташування буде відрізнятися від південних та східних регіонів. Кожен власник сонячної панелі, звісно ж хоче, щоб його батарея виробляла максимально можливу кількість енергії весь рік. Досягти таких параметрів можна за допомогою трекера, який за допомогою інформації зі спеціальних датчиків визначить оптимальне положення для сонячної батареї та здійснить поворот платформи з необхідну сторону та під правильним кутом. [1]

Метою даної роботи є аналіз вже існуючих літературних джерел стосовно питань сонячної енергетики та використання трекерів різних типів, принцип їх роботи та загальну будову, а також розробка трекера для сонячної батареї.

## РОЗДІЛ 1. ЗАГАЛЬНЕ ПОНЯТТЯ ПРО СОНЯЧНУ ЕНЕРГІЮ

### 1.1. Загальні відомості про сонячну енергетику

У наш час в суспільстві зміцнюється розуміння того, що енергетика в майбутньому має ґрунтуватися на широкомасштабному застосуванні сонячної енергії, притому в різних її проявах. Сонце – це велике, невичерпне, повністю безпечне джерело енергії, яке однаково всім належить і так само всім доступне. Ставка на сонячну енергетику має бути розглянута не тільки як безпрограшний, але в довгостроковій перспективі і як безальтернативний вибір для людства [2].

Середньорічний об'єм сумарного випромінювання сонячної енергії, яка надходить щорічно на територію України, знаходиться в межах від 1 070 кВт·год/м. В північній частині України до 1 400 кВт·год/м. кв (рис. 1.1) [4].

Фотоенергетичне обладнання може досить ефективно експлуатуватися протягом всього року але, максимально ефективно лише в період семи місяців на рік (з квітня по жовтень).

Перетворення сонячної енергії в електричну в умовах України варто орієнтувати в першу чергу на використання фотоелектричних пристроїв. Наявність значних запасів сировини, промислової та науково-технічної бази для виготовлення фотоелектричних пристроїв може забезпечити сповна не тільки потреби вітчизняних споживачів, але й експортувати більше двох третин виробленої продукції.

На 01.01.15 року в Україні діяло 98 сонячних станцій загальною встановленою потужністю 819 МВт, якими у 2014 році вироблено 485 млн. кВт\*год електричної енергії [4].

Взявши до уваги досвід з використання сонячних електростанцій (далі – СЕС) в країнах Європи з подібним рівнем сонячного випромінювання, а також дивлячись на світові тенденції стабільного зниження власної вартості будівництва СЕС внаслідок розвитку технологій, в Україні за рахунок покращення технології та введення в експлуатацію нових потужностей виробництво електроенергії СЕС може бути значно збільшено.

Умовно територію України можна розділити на чотири зони, залежно від інтенсивності сонячної радіації [3].



Рисунок 1.1 – Розподіл питомої сумарної сонячної радіації на території України протягом року. Адаптовано із роботи [3]

Досвід країн Європейського Союзу та північної Америки свідчить, що сонячна енергія може перероблятися в електричну в промисловому масштабі навіть вночі. В Іспанії і США існують підприємства, що в нічний час доби перетворюють електроенергію з тепла накопиченого за день [3].

## 1.2. Принцип роботи сонячної панелі

Відомо, що основу сонячної батареї складає кристалічний фотоелемент – активна частина, яка при потраплянні на неї сонячного світла, перетворює її в електричний струм. Даний фотоелемент розділяється на монокристал та полікристал. Принципова їх різниця полягає в технології виготовлення. Справа в тому, що у випадку створення монокристалічного за основу береться один великий розплав напівпровідника кремнію і бору, що занурюється в початковий кристал, який є затравкою. Після досягнення температури кристалізації, його поступово дістають і опісля обробляють для приведення до необхідної форми. Цей метод створення монокристалу називається методом Чохральського. Щодо полікристалу, то його формування відбувається дещо іншим способом:

кремнієво–боровий розплав охолоджують до отримання потрібної ємності. Даний розплав складається з кількох кристалів, котрі є однорідні за складом, проте різні за розмірами – через що в результаті панель і отримує певний зернистий візерунок. Обробка даного кристалу надалі відбувається за аналогічним до монокристалічного, методом [4].

Окрім фотоелемента, в склад сонячної панелі входять струмознімні доріжки, які проводять отриманий струм з фотомодуля до розподільчої коробки. Розподільча коробка у більшості панелей обладнана захисними діодами Шотткі, які захищають її від затінення та перегріву. Фотоелемент, для ізоляції струму, ламінують спеціальним EVA – шаром, який герметизує елементи панелі, захищає їх від корозії та впливу навколишнього середовища. Загартоване скло додає конструкції міцності та виконує захисну функцію у випадку дощу, граду та будь-яких інших механічних впливів на фотомодуль. Закріплюється це все алюмінієва рама, призначена для кріплення кількох панелей у одну загальну конструкцію, котру можна встановлювати на землю або дах будинку (рис. 1.2) [4].



Рисунок 1.2 – Будова сонячної панелі. Адаптовано із роботи [4]

Принцип роботи сонячної панелі базується на фотогальванічному ефекті, який показує, що сонячний промінь можна перетворити на електроенергію, накопичувати та використовувати завдяки роботі напівпровідників. Якщо коротко охарактеризувати даний процес, то він відбувається так: сонячний промінь потрапляє на поверхню  $p-n$  – шару провідника та вибиває з нього електрони. Після цього дані електрони з певним зарядом переміщуються по колу, що дозволяє живити електроспоживача, підключеного до даного кола (рис. 1.3) [5].

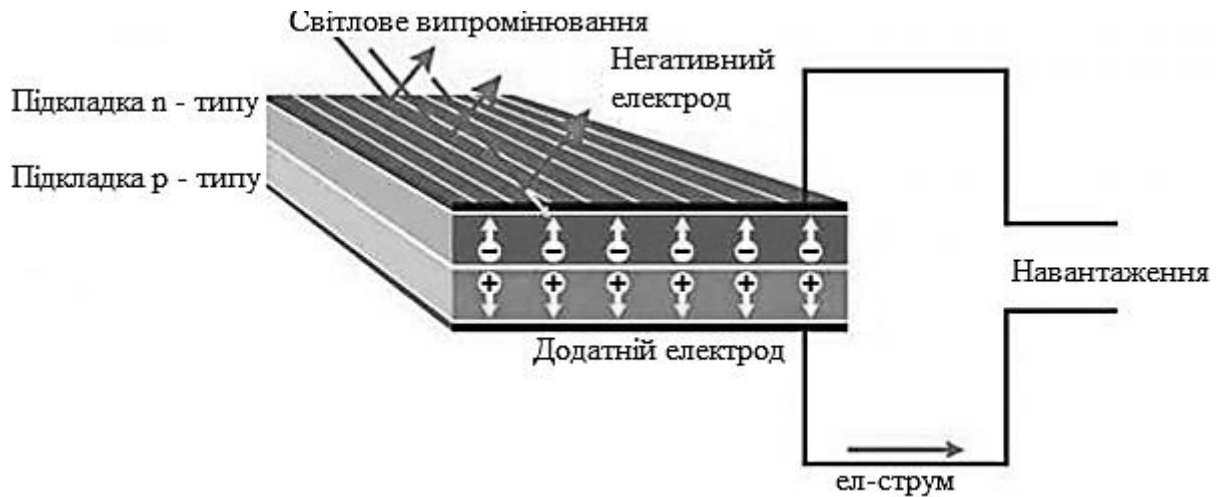


Рисунок 1.3 – Принцип роботи сонячної панелі. Адаптовано із роботи [5]

Даний  $p-n$  – перехід зазвичай використовують у роботі діодів та трансформаторів.

Одною з найбільш поширених проблем, котрі можуть виникнути при роботі сонячної панелі є затінення. При затіненні частини панелі, даний сектор перестає генерувати електроенергію. Інші частини панелі, що працюють, намагаються «компенсувати» її роботу. Як наслідок – відбувається високе перевищення напруги, що супроводжується надмірною температурою, яка може просто спалити панель. Сучасні виробники намагаються активно боротися з даною проблемою, використовуючи діоди Шоттки для захисту панелі від перегріву [4].

Щось подібне відбувається і при дії сонячного випромінювання на сонячний елемент. Коли фотон світла влітає в шари « $n$ » і « $p$ », він передає свою енергію електронам (що знаходяться на зовнішній оболонці атомів), котрі вивільняються, а на їх місці з'являється дірка. Електрони з отриманою енергією вільно долають замикаючий шар напівпровідника і переходять з шару « $p$ » в шар « $n$ », а дірки, навпаки, переходять з шару « $n$ » у шар « $p$ ».

Цьому переходу електронів їх області « $p$ » в область « $n$ » і дірок з області « $n$ » у область « $p$ », також сприяють електричні поля позитивних зарядів, що знаходиться в зоні « $n$ » провідника і негативних - в зоні « $p$ », які ніби втягують в себе, одні - електрони, інші - дірки. У підсумку, шар « $n$ » набуває додаткового



негативного заряду, а «*p*» - позитивного. Результатом цього явища буде поява в напівпровіднику різниці потенціалів (напруги) між двома пластинами близької до 0.5 В [5].

Сила електричного струму, який може виробляти сонячний елемент, змінюється пропорційно до кількості захоплених поверхнею фотоелемента фотонів. Цей показник, у свою чергу, також залежить від багатьох додаткових чинників: інтенсивності світлового випромінювання, площі, яку має фотоелемент, часу експлуатації, ККД пристрою, що залежить від температури (при її підвищенні, провідність фотоелемента значно падає).

Саме тому потрібно пам'ятати про наступне: сонячні елементи (фотоелементи, батареї) не можуть бути дуже потужними, вони не можуть працювати в безперервному режимі (через природну зміну дня і ночі), для стабілізації основних параметрів - сили струму і напруги - з'являється необхідність у використанні додаткових пристроїв (стабілізатори, акумулятори тощо) [4].

Але як додаткове джерело електроенергії сонячні елементи (батареї) успішно можуть використовуватися в місцях, де потрібні невеликі потужності і відсутня можливість підключитися до загальної електромагістралі. При поєднанні роботи сонячного елемента і електричного акумулятора, виходить повністю автономна система електропостачання, яку можна використовувати в районах з гарною сонячною освітленістю і потребою в малих електричних потужностях.

На рис. 1.4, який наведений вище, видно, що верхній шар *p-n* переходу, який має надлишкові електрони, з'єднаний з металевими пластинами, які є позитивними електродами провідності, пропускаючи світло і додаючи елементу додаткову жорсткість. Нижній шар в конструкції сонячної батареї має нестачу електронів, до нього приклеєна суцільна металева пластина, що виконує функцію негативного електрода (рис. 1.4).

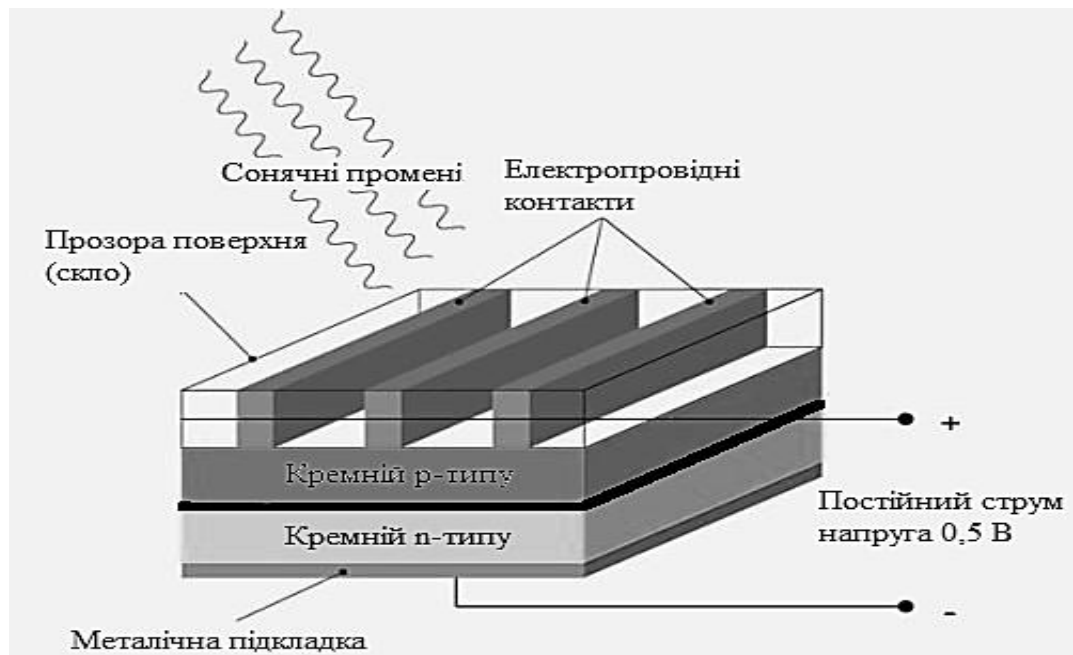


Рисунок 1.4 – Принцип роботи сонячного елемента. Адаптовано із роботи [5]

На даний момент відомо, що продуктивність ідеальної сонячної батареї досягає 20% ККД. При тому на практиці він приблизно дорівнює всього 10%, при тому, що для деяких сонячних батарей він більший, для деяких менший. В основному це залежить від технології, за якою виконаний *p-n* перехід. Найбільш вживаними та такими, що мають найбільший відсоток ККД, продовжують бути сонячні батареї, виготовлені на основі монокристалу або полікристалу кремнію. Причому другі через відносну дешевизну стають дедалі поширенішими [5].

Тип конструкції сонячної панелі можна визначити за зовнішніми ознаками. Монокристалічні бувають виключно чорно-сірого кольору, а моделі на основі полікристалу кремнію має синю поверхню. Полікристалічні сонячні батареї, виготовлені методом лиття, є більш дешевшими у виробництві. Проте і в полі, і в монокристалічних пластин є один недолік - конструкції сонячних батарей на їх основі не мають гнучкості, яка в деяких випадках потрібна.

Ситуація змінилась з появою в 1975 році сонячної батареї на основі аморфного кремнію, активний елемент якої має товщину від 0,5 до 1 мкм,

забезпечуючи їй гнучкість. Товщина звичайних кремнієвих елементів досягає 300 мкм. Однак, незважаючи на властивість аморфного кремнію поглинати світло, яка приблизно в 20 разів вище, ніж у звичайного, ефективність сонячних батарей такого типу не перевищує 12%. Для моно- і полікристалічних варіантів він може досягати 17% і 15% відповідно.

Матеріал, з якого виготовлені пластини, впливає на характеристики сонячних батарей.

Чистий кремній у виробництві пластин для сонячних елементів практично не використовується. Найчастіше в якості домішок для виготовлення пластини, що виробляє позитивний заряд, використовується бор, а для негативно заряджених пластин миш'як. Крім них при виробництві сонячних елементів все частіше використовуються такі компоненти, як арсенід, галій, мідь, кадмій, телурид, селен та інші. Завдяки ним сонячні елементи стають менш чутливими до перепадів температури навколишнього середовища.

Більшість сонячних батарей володіють можливістю накопичувати енергію, представляючи собою так звані системи. Враховуючи, що фотоелектричні елементи виробляють електричний струм тільки при прямому впливі сонячних променів або світла, вночі або в похмурий день вони стають практично недієздатними. З системами на сонячних батареях все відбувається іншим чином. Вони обладнані акумулятором, який здатний накопичувати електричний струм вдень, коли сонячна батарея його виробляє, а вночі накопичений заряд може віддаватись споживачам [5].

### **1.3. Особливості та переваги трекера для сонячних електростанцій**

Ефективність роботи сонячної панелі характеризується кількістю енергії сонця, яку отримує панель. Генерація електроенергії найбільш інтенсивна, коли промені потрапляють на модуль під кутом  $90^\circ$ . Але сонце постійно змінює положення, тому стаціонарні конструкції не розкривають повністю потенціал сонячної батареї. Щоб домогтися високих показників, потрібно встановити

трекер для сонячних батарей. Цей пристрій допоможе зберегти необхідний кут ухилу на протязі всього дня. Розглянемо докладніше особливості трекара для керування сонячними панелями [1].

1. Діляться на два типи:

– одновісні – протягом дня трекер автоматично буде змінювати кут в горизонтальній площині. Сонячна станція рухається по траєкторії зі сходу захід, завдяки чому збільшує свою продуктивність на 15-20% у порівнянні зі статичною системою [7];

– двовісні – трекер рухається і в горизонтальній, і у вертикальній площині, тобто повертається за сонцем для максимальної енергоефективності. На відміну від статичної системи, протягом року може збільшити продуктивність на 35-50%.

2. Міцна конструкція – системи кріплення на трекарах виготовляються із високоякісного екструдованого алюмінієвого профілю, сталі (покритої захисним шаром цинку товщиною до 70 мкм.), вуглецевої сталі з цинк-дисперсним покриттям, нержавіючої сталі. Підбір матеріалів, що застосовуються в конструкціях повністю виключає корозійне руйнування, в тому числі і внаслідок електрохімічної корозії протягом 25-30 років.

3. Фундаментом для трекара є бетон, вартість розраховується індивідуально, залежить від ґрунту, особливостей регіону та побажань власника. Корзина фундаменту може сягати трьох метрів, закріплюється трекер анкерами.

4. Система керування складається з комплексного датчика сонячної радіації та блоку керування трекером. Система знаходить найкращу точку максимальної потужності сонячної енергії, враховуючи розсіяне та відбите сонячне світло. Сигнал передається з датчика на блок керування – тоді трекер за допомогою двигунів, повертає конструкцію в найвигідніше положення.

5. Моніторинг сонячної системи на трекері може відбуватися цілодобово через доступ до Інтернету, також віддалено можна стежити і за технічним станом установки.

6. Легка адаптивність до погодних умов (сніг, вітер, град) [8].

Переваги динамічних систем кріплення для сонячних електростанцій:

- максимально ефективно, в порівнянні зі статичними, використання енергії сонця для вироблення електроенергії;
- збільшення вироблення електроенергії до 50% у порівнянні зі статичними системами;
- збільшення «зеленого тарифу» на 5% в Україні;
- зменшення періоду окупності інвестицій в будівництво СЕС;
- значне збільшення прибутків до кінця терміну дії «зеленого тарифу» в Україні.

Отже встановлення сонячних панелей на трекери є досить вигідним з точки зору продуктивності. Адже при їх використанні ККД зростає майже на 50% від початкової. Також є можливість стежити за станом установки та коригувати її положення згідно погодних умов [6].

#### **1.4. Варіанти встановлення сонячних електростанцій на трекерах.**

Особливості встановлення панелі на одновісному трекері:

- наземні системи встановлення;
- двохопорна конструкція;
- вертикальна орієнтація фотоелектричних модулів;
- двохрядна система кріплення для 20 модулів;
- для каркасних і безкаркасних ФЕМ;
- кут нахилу:  $0^{\circ}$ - $70^{\circ}$  – південь-північ,  $\pm 50^{\circ}$  – схід-захід;
- встановлена потужність: до 6 кВт;
- зміна кута нахилу за допомогою актуаторів;
- робоча напруга: 100-260 В змінного струму / 50-60 Гц.;
- стандартна гарантія 10 років на сталеві і алюмінієві конструкції, 2 роки на активну систему керування і електромеханічне устаткування (рис.1.5) [7].

Особливості встановлення панелі на двовісному трекері:

- наземні системи встановлення;

- для каркасних і безкаркасних ФЕМ;
- моделі для 12 – 40 ФЕМ;
- встановлена потужність: до 12 кВт;
- опорно-поворотний пристрій для обертання по азимуту і механізмом (актуатор) – по зеніту;
- робоча напруга: 100-260 В змінного струму / 50-60 Гц;
- стандартна гарантія 10 років на сталеві і алюмінієві конструкції, 2 роки на активну систему керування і електромеханічне устаткування

Приклади установки сонячної панелі на одновісному та двовісному трекері зображені на рисунках 1.5 та 1.6.

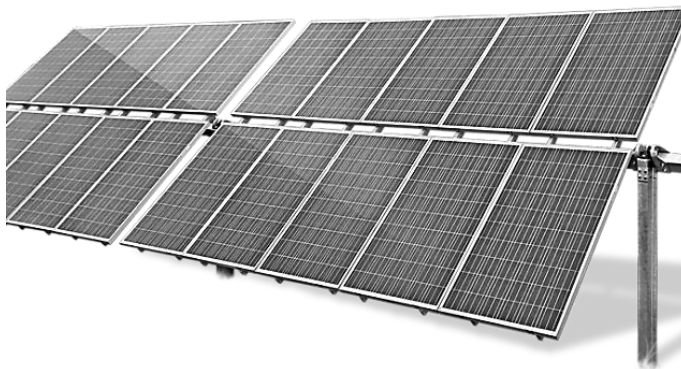


Рисунок 1.5 – Установка сонячної панелі на одновісному трекері. Із роботи [7]

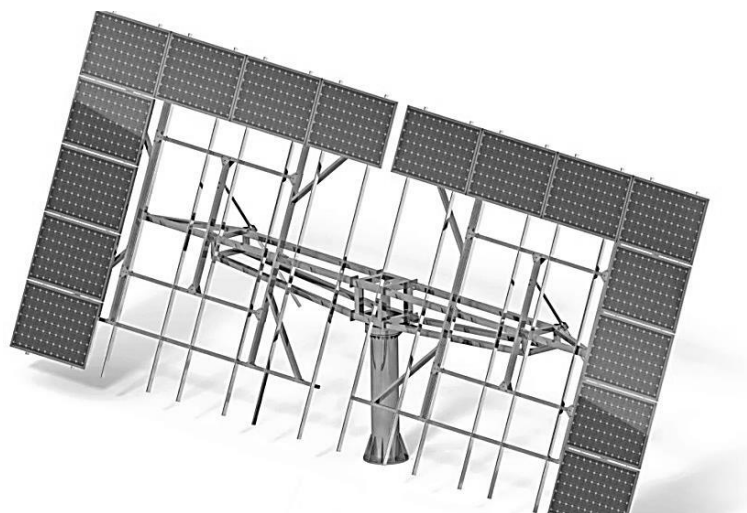


Рисунок 1.6 – Установка сонячної панелі на двовісному трекері. Із роботи [7]

Система монтажу сонячної панелі обирається індивідуально і залежить від завдання проекту, а також рельєфу місцевості, на якій буде встановлюватись конструкція. Також важливо звернути увагу на особливості погодних умов місцевості, середню швидкість вітру, адже двовісний трекер окрім вище вказаних переваг, має також такий недолік, нижча стійкість до поривів вітру ніж у одновісного трекера. Також не мале значення має фінансова можливість, адже вартість двовісного трекера вища і в обслуговуванні він більш затратний [7].

## РОЗДІЛ 2. РОЗРОБКА СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ТРЕКЕРОМ

### 2.1. Алгоритм роботи приладу

Розроблений прилад має отримувати дані з датчиків різних типів, які встановлені на трекері сонячної панелі, при цьому за нормальних показників, розраховуються Азимутальний і Зенітний кути. Отримані дані порівнюються з вказаними в пам'яті пристрою. Трекер, за допомогою серводвигунів розташовується так, щоб сонячні промені були під прямим кутом до панелі. Також повинна бути реалізована можливість повертання активної частини трекера у вихідне положення на початку нового дня.

У відповідності до поставленої задачі складемо алгоритм роботи пристрою що проектується. Робота пристрою розпочинається з його ініціалізації. Починається циклічне опитування підключених датчиків, а саме положення акселерометра та магнітометра у просторі, перевірка даних з годинника реального часу. Для отримання даних з датчиків виконується опитування портів вводу-виводу мікроконтролера. Показання записуються в пам'ять пристрою. Після опитування всіх датчиків, пристрій виконує обробку даних. Як результат обчислюються Азимутальний і Зенітний кути. У відповідності до поточної дати і часу, пристрій порівнює дані з попередньо заданими, якщо показання відрізняються, пристрій змінює положення за допомогою сервоприводів трекера до тих пір, поки кути не стануть дорівнювати поточним кутам розташування Сонця.

Алгоритм роботи трекера управління для сонячної панелі приведений у вигляді блоків на рисунку 2.1

Відповідно до нижче наведеного алгоритму відбувається орієнтування установки трекера сонячної панелі за необхідним напрямком, згідно руху сонця на небосхилі у певний час доби будь-якого дня року, незалежно від точки знаходження самої установки.



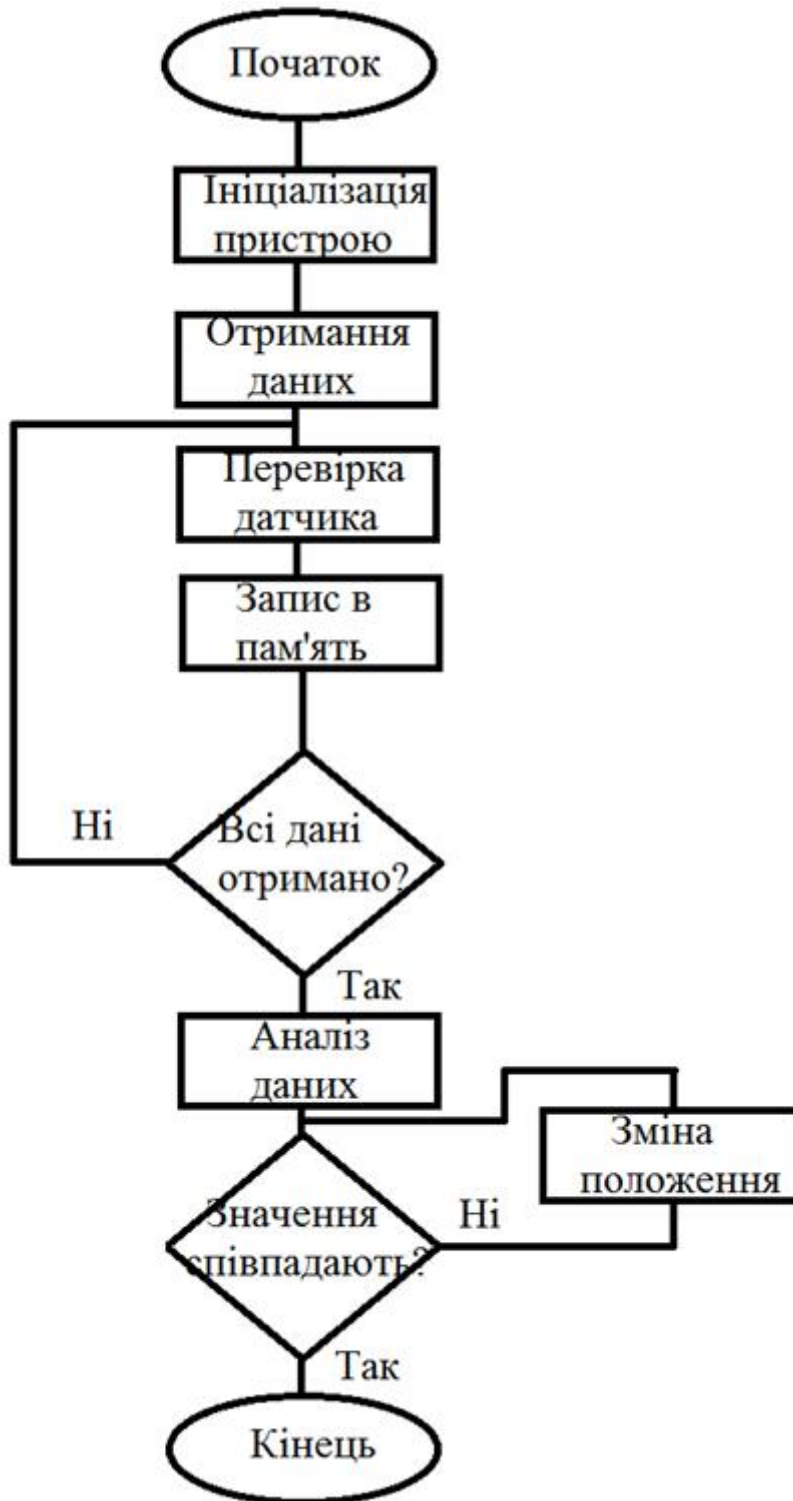


Рисунок 2.1 – Блок-схема алгоритму роботи пристрою

## 2.2. Розробка структурної схеми пристрою

Для реалізації заданого алгоритму роботи необхідні функціональні блоки, які приведені на структурній схемі пристрою (рис. 2.2).

Пристрій можна умовно поділити на декілька частин: блок збору даних та блок обробки показань.

Датчики потрібні для виміру фізичних величин, значення яких потрібно постійно аналізувати.

Система узгодження представляє собою драйвер для роботи серводвигунів.

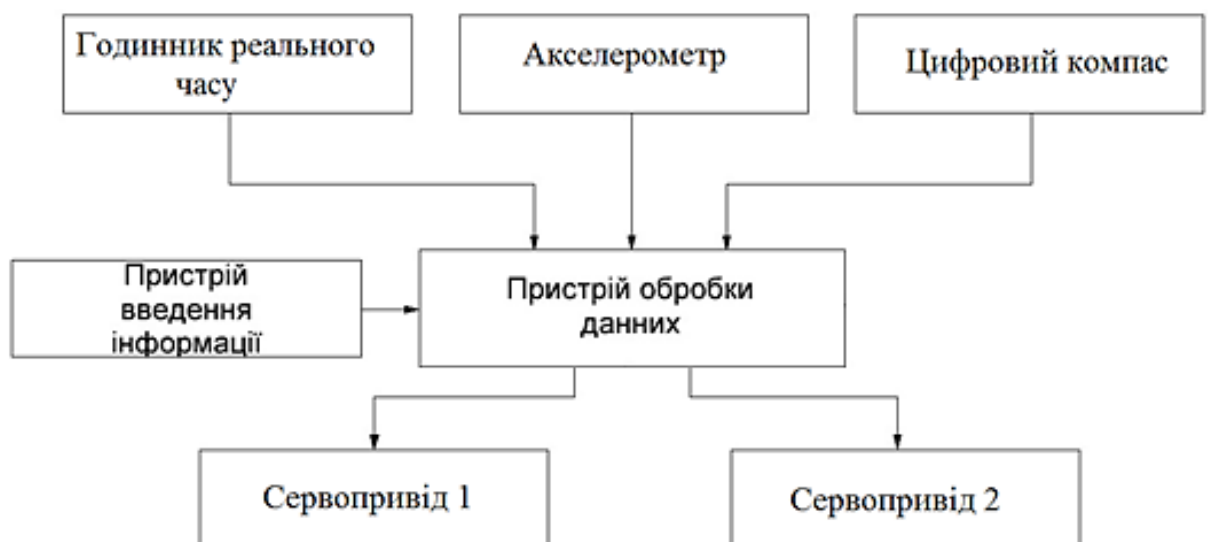


Рисунок 2.2 – Структурна схема пристрою

Виконуючим механізмом є пара сервоприводів, що здійснюють поворот платформи відповідно сигналу від мікроконтролера.

Пристрій обробки даних є центральним вузлом проектованого пристрою, він займається управлінням опитування датчиків, обробляє отримані дані, передає їх на пристрій виведення інформації, і керує підключеним до нього навантаженням.

### 2.3. Розробка функціональної схеми пристрою

Оскільки в розроблюваній схемі передбачається проведення циклічного отримання інформації з датчиків, математичні розрахунки, виведення результатів на дисплей та керування сервоприводами, систему доцільно виконати на базі мікроконтролера.

Умовно систему можна розділити на декілька блоків:

- 1) блок визначення орієнтації трека у просторі;
- 2) мікроконтролер, який порівнює показання датчиків з координатами сонця в даний період часу, виконує керування поворотом трека.

Система орієнтації у просторі буде складатися з модуля електронного компаса і датчика кута нахилу (акселерометра). Цього цілком достатньо, щоб мати досить точні дані для повороту трека.

Тобто в розроблювальній схемі в якості датчиків будуть використані:

- 1) акселерометр – пристрій, який вимірює різницю між істинним прискоренням об'єкта та гравітаційним прискоренням, тобто інерційну масу. Завдяки чому датчик видає дані про своє положення в просторі. Ці дані, за допомогою математичних розрахунків будуть переведені в значення Zenітного кута;

- 2) магнітометр - пристрій для вимірювання інтенсивності однієї або декількох складових магнітного поля. Магнітне поле Землі в кожній точці простору характеризується вектором напруженості  $T$ , напрям якого визначається трьома складовими по осях  $X$ ,  $Y$  і  $Z$  в прямокутній системі координат (рис. 2.3). Також магнітне поле Землі можна описати горизонтальною складовою напруженості  $H$  (Азимутальний кут);

До мікроконтролера (МК) підключаються акселерометр, магнітометр та годинник реального часу, з яких МК буде отримувати вхідні дані. Весь пристрій через USB-вихід буде отримувати живлення, а також через той же самий вихід передавати інформацію на персональний комп'ютер (ПК). Функціональна схема проєктованого пристрою зображена на рисунку 2.4.

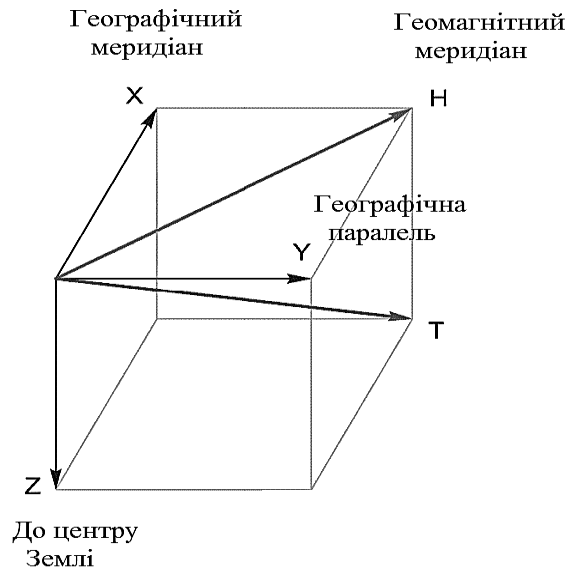


Рисунок 2.3 – Основні складові магнітного поля Землі. Із роботи [8]

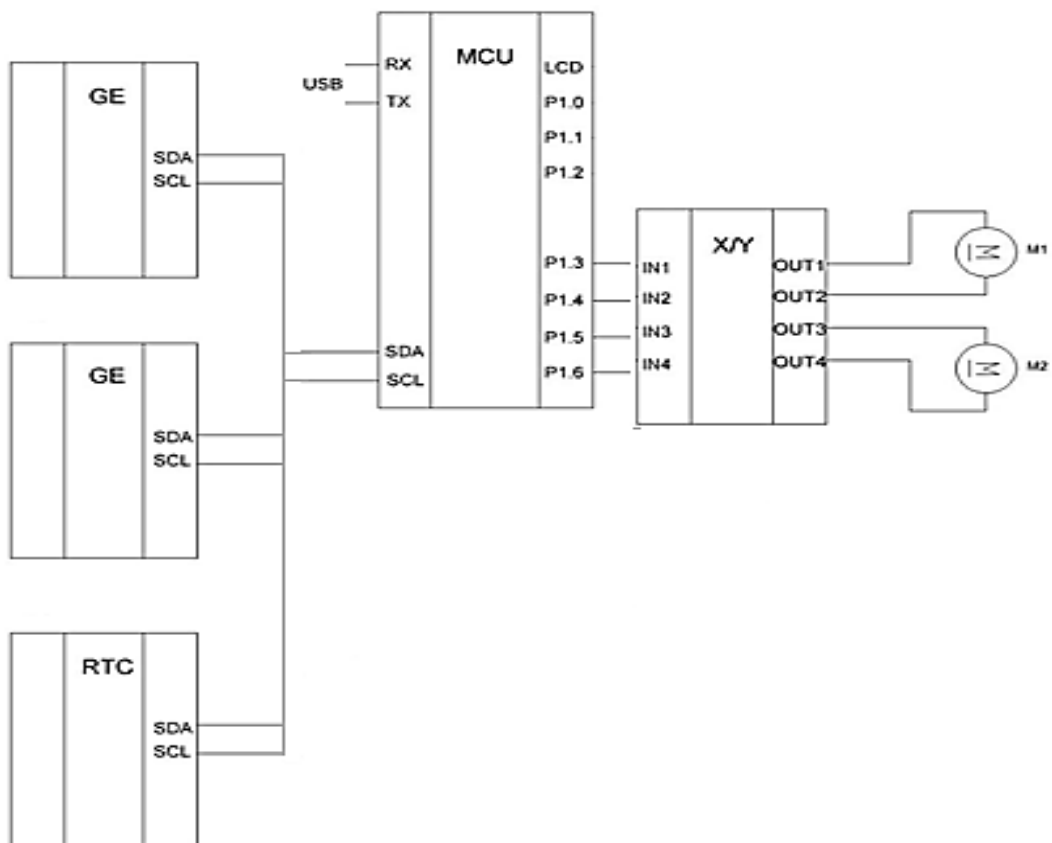


Рисунок 2.4 – Функціональна схема розроблюваного пристрою

3) годинник реального часу – пристрій, за допомогою якого, можна визначити, дату і час. Так як Сонце змінює своє положення в небі в залежності від пори року і часу доби, необхідно знати інформацію про дату і час в даний момент. В пам'яті мікроконтролера необхідно створити таблицю відповідності кутів положення сонця від поточних показань годинника реального часу.

#### 2.4. Вибір елементної бази

Вибір мікроконтролера. У якості мікроконтролера (МК) було вирішено обрати Arduino Uno на ATmega328. У зв'язку з бюджетною ціною даного контролера та достатнім спектром можливостей для створення на його базі кінцевого приладу (рис. 2.5).

Таблиця 2.1 – Характеристики МК [9]

Мікроконтролер	ATmega328
Робоча напруга	5 В
Вхідна напруга (Рекомендована)	7-12 В
Вихідна напруга (Гранична)	6-20 В
Цифрові входи/виходи	14
Аналогові входи	6
Постійний струм через вхід/вихід	40 мА
Постійний струм для виводу 3.3В	50 мА
Флеш-пам'ять	32 Кб (ATmega328)
ОЗУ	2 Кб (ATmega328)
EEPROM	1 Кб (ATmega328)
Тактова частота	16 МГц

Згідно даних таблиці 2.1, МК Arduino Uno повністю підходить для поставленої задачі [9].

Як годинник реального часу було вирішено обрати мікросхему DS3231, зображену на рис. 2.6. Так як наш пристрій буде експлуатуватись в різних температурних умовах, то в якості модуля годинника реального часу (real-time clock, RTC) обрано DS3231 через його ціну і стабільність, згідно даних наведених у таблиці 2.2.

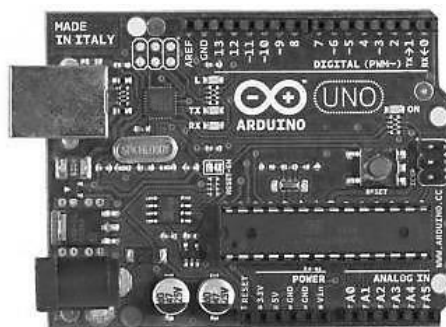


Рисунок 2.5 – Загальний вигляд плати Arduino Uno. Із роботи [9]



Рисунок 2.6 – Загальний вигляд модуля годинника реального часу DS3231. Із роботи [10]

RTC забезпечує відлік секунд, хвилин, годин, днів тижня, днів місяця і року. Дата кінця місяця визначається автоматично з урахуванням високосного року. Годинник реального часу працює в 24 або 12-годинному форматі з індикацією поточної половини доби (AM / PM) [10].

Програмний код підключення і роботи годинника реального часу наведено у додатку Б.

Таблиця 2.2 - Характеристики RTC DS3231 [10]

Мікросхема годинника	DS3231
Напруга живлення	від 2.3 В до 5.5 В
Робоча температура	від -40 ° С до + 85 ° С
Точність ходу годинника	± 5ppm (± 0.432 сек/день)
Резервне живлення	LiPo акумулятор
Параметри часу	годинник і календар
Сигнали календаря	два сигнали
Цифрові виходи	1 Гц и 32.768 кГц
Інтерфейс	I2C 400 кГц
Адреса пристрою	0x68
Точність датчика температури	± 3 ° С

Щоб орієнтувати сонячний трекер відносно горизонтальної осі необхідно знати кути нахилу трекера. Для таких цілей ідеально підходить датчик акселерометра, що дозволяє також визначати положення в просторі.

Акселерометр - це інструмент, задача якого полягає у вимірюванні проекції повного прискорення тіла, для виміру використовуються три чутливі осі: X, Y і Z [11].

Програмний код підключення акселерометра, калібрування та його роботи наведено у додатку А

В якості такого датчика був обраний цифровий акселерометр MPU-6050 GY-521 (рис. 2.7). Його характеристики вказані в таблиці 2.3.

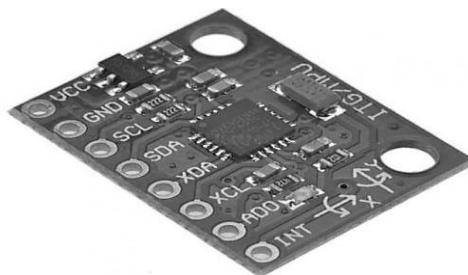


Рисунок 2.7 – Зображення модуля акселерометра MPU-6050 GY-521.

Із роботи [16]

Вище вказаний акселерометр було обрано виходячи з поставленої задачі, а також цей акселерометр має зручний інтерфейс підключення та програмування в середовищі Arduino.

Таблиця 2.3 – Характеристики акселерометра MPU-6050 GY-521 [16]

Живлення	3 - 5В
Чіп	MPU-6050
Діапазон гіроскопа	+ 250 - -250°/ с
Діапазон акселерометра	$\pm 2 \pm 4 \pm 8 \pm 16$ g
Протокол	ІС (він же I2C, він же TWI)
АЦП	вмонтований 16-бітний
Розміри плати	2 x 1.6 см

Так як визначення положення щодо вертикальної осі залишилося без уваги вибір для цих цілей чутливого датчика є актуальною задачею. Для цього задіємо трьохосьовий магнітометр (цифровий компас) QMC5883L. Він досить поширений, недорогий і володіє достатньою точністю для даного проекту, має інтерфейс підключення Arduino (рис. 2.8).

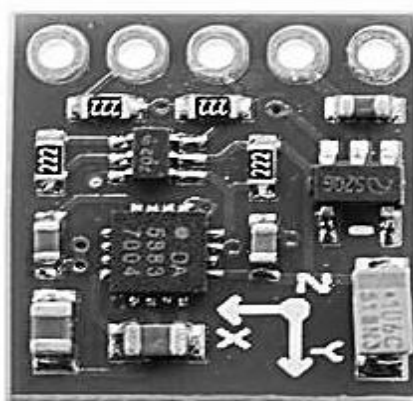


Рисунок 2.8 – Зовнішній вигляд модуля магнітного компаса GY-271.

Із роботи [17]

При повороті трьохосьового магнітометра в магнітному полі Землі показання на його трьох осях змінюються. Використовуючи ці дані можна



визначити напрямок по сторонах світу. Знаючи показання з осей X, Y можливо обчислити кут, який і буде кутом відхилення від напрямку на північ. В такому режимі модуль виконує роль компаса. Характеристики модуля магнітного компаса GY-271 вказані в таблиці 2.4.

Для коректної роботи магнітного компаса був написаний програмний код наведений у додатку А.

Таблиця 2.4 – Характеристики магнітного компаса GY-271 [17]

Датчик	QMC5883L
Живлення	5 В
Протокол зв'язку	стандартний I2C
I2C адреса пристрою	0x0D
Діапазон вимірювань	$\pm 1.3-8$ Гаусс, точність 5 мілі-Гаусс
Розміри плати	14 x 13 мм

При вирішенні задачі зміни положення трекера, виникає необхідність у виборі виконавчих пристроїв, тобто таких елементів системи, які б перетворювали електричну енергію в механічний рух. Для цих цілей підходять сервоприводи.

Для поворотів конструкції трекера достатньо можливостей сервопривода моделі SG90 2кг (рис. 2.9). Його робоче механічне навантаження становить 2 кілограми, чого повністю достатньо для роботи конструкції трекера.



Рисунок 2.9 – Зовнішній вигляд сервопривода. Із роботи [14]

Таблиця 2.5 – Характеристики сервопривода моделі SG90 [14]

Швидкість без навантаження	0.12 сек/60 град. при живленні 4.8В
Обертний момент	2 кг/см
Температурний діапазон	від 0 до +50°C
Ширина мертвої зони	4 мікросекунди
Робоча напруга живлення	3.5-5 В
Струм живлення в русі	50-80 мА
Струм живлення в утриманні	5-10 мА
Кут повороту	180 градусів
Розміри	3.3 см x 3 см x 1.3 см
Вага	9 г

Всі компоненти приладу були обрані виходячи з співвідношення необхідних характеристик для роботи, а також економічної доцільності кінцевого приладу.

## РОЗДІЛ 3. ДОСЛІДЖЕННЯ РОБОТИ СОНЯЧНОЇ ПАНЕЛІ

### 3.1. Розрахунок потужності сонячної панелі без трекара

В процесі розробки сонячного трекара були проведені вимірювання значень вихідних струму та напруги при стаціонарному встановленні сонячної панелі без використання трекара у напрямку на південь, за умов інтенсивного сонячного випромінювання. Дані вимірювань наведені в таблиці 3.1.

Таблиця 3.1 – Дані роботи сонячної панелі без трекара

Час T, год	Струм I, А	Напруга U, В	Потужність P, Вт
7	0,25	5,1	1,28
8	0,25	5,15	1,29
9	0,26	5,2	1,35
10	0,27	5,3	1,43
11	0,29	5,5	1,60
12	0,31	5,7	1,77
13	0,32	5,8	1,86
14	0,3	5,7	1,71
15	0,29	5,6	1,62
16	0,28	5,5	1,54
17	0,26	5,4	1,40
18	0,25	5,3	1,33
19	0,24	5,2	1,25

Вихідну потужність було розраховано за формулою (3.1):

$$P = U \cdot I \quad (3.1)$$

Виходячи з даних наведених у таблиці 3.1, було побудовано графік залежності потужності від часу доби наведений на рисунку 3.1.

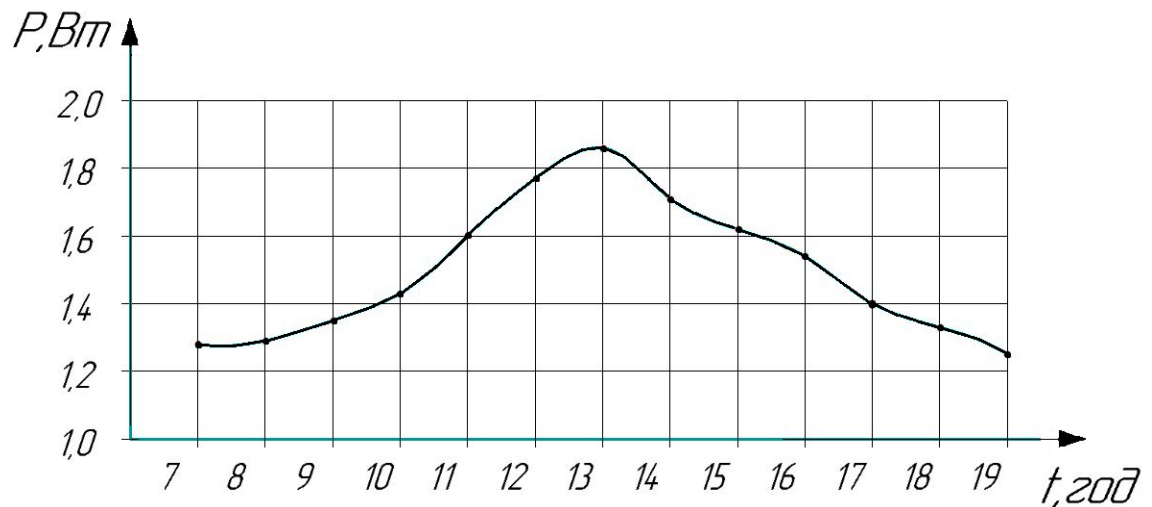


Рисунок 3.1 – Графік залежності потужності, яку виробляє сонячна панель від часу доби при стаціонарній установці.

З наведеного вище графіка ми бачимо, що вранці панель працює на низькій потужності, після чого плавно піднімається до максимального значення опівдні, після чого знову плавно знижується до мінімальної потужності ввечері. При цьому середня добова потужність ( $P$ ) при стаціонарному встановленні сонячної панелі становить 1,43 Ват.

### 3.2. Розрахунок потужності сонячної панелі на сонячному трекері

В другому експерименті було виміряно дані вихідного струму та вихідної напруги з сонячної панелі за умови її установки на двовісному сонячному трекері, за умови інтенсивного сонячного випромінювання. Отримані дані були систематизовані та наведені в таблиці 3.2. Значення вихідної потужності були розраховані за тією ж формулою, що і в першому експерименті. Виходячи з отриманих даних можна помітити, що результати покращились.

На рисунку 3.2 зображений графік залежності вихідної потужності від часу доби, за умови використання трекера.

Таблиця 3.1. Дані роботи сонячної панелі з трекером

Час T, год	Струм I, А	Напруга U, В	Потужність P, Вт
7	0,28	5,6	1,56
8	0,28	5,6	1,56
9	0,29	5,7	1,65
10	0,29	5,7	1,65
11	0,30	5,7	1,71
12	0,31	5,9	1,83
13	0,32	5,9	1,89
14	0,31	5,8	1,80
15	0,30	5,7	1,71
16	0,29	5,7	1,65
17	0,28	5,6	1,57
18	0,28	5,6	1,57
19	0,27	5,5	1,49

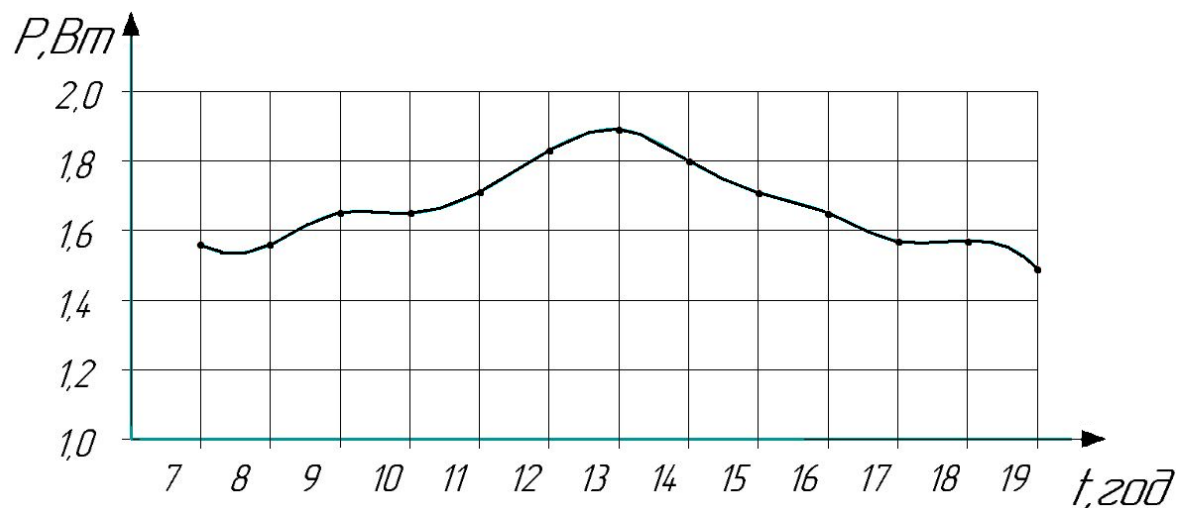


Рисунок 3.2 – Графік залежності потужності, яку виробляє сонячна панель від часу доби при установці на трекері.

Проаналізувавши графік з рисунку 3.2 можна зробити висновок, що вихідна потужність при використанні трекера є більш стабільною.

На рисунку 3.3 зображені графіки порівняння вихідної напруги ( $P(t)$ ) сонячної панелі з трекером і без нього ( $P$ ).

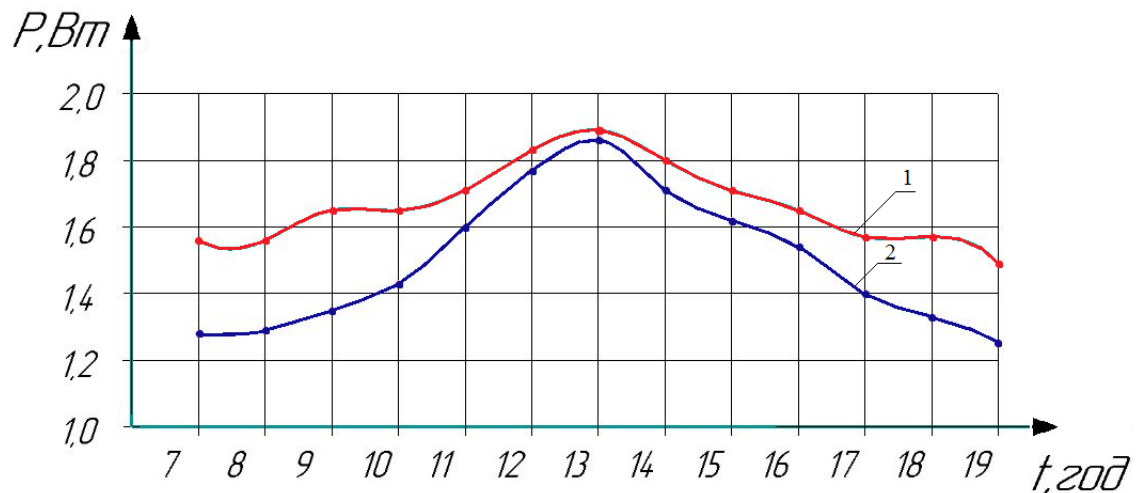


Рисунок 3.3. Графіки порівняння вихідної потужності з трекером – 1 та без трекера – 2.

Середня вихідна потужність панелі з трекером становить 1,71 Ват що на 0,28 Ват більше ніж у стаціонарно встановленої сонячної батареї.

З проведеного дослідження випливає, що використання трекера є повністю обгрунтованим, оскільки значно підвищує продуктивність сонячної панелі, що і видно з графіка, представленого на рисунку 3.3. Завдяки використанню двовісного трекера сонячна панель працює максимально продуктивно і має можливість перетворювати значно більше енергії сонячного світла в електричну енергію.

Також робота сонячної панелі при використанні сонячного трекера є більш стабільною, оскільки підвищує продуктивність, а також зменшує час окупності сонячної панелі і всієї конструкції в цілому.

## ВИСНОВКИ

1. Для підвищення ефективності роботи сонячних батарей використовують треки, що мають можливість змінювати свою орієнтацію, а також кут нахилу відносно розташування сонця в певний момент часу. Вони забезпечують автоматичний поворот сонячних панелей за кутом до горизонту та азимутом так, щоб сонячні промені падали на батарею перпендикулярно поверхні.

2. Системи стеження за сонцем поділяють за кількістю осей свободи. Трекер з однією поворотною віссю має один ступінь свободи. Такі пристрої можуть мати горизонтальні, вертикальні і нахилені осі обертання. Горизонтальні різновиди орієнтують батареї відносно поверхні землі. Вертикальні моделі орієнтують сонячні батареї відносно сторін світу. Трекери, які мають дві поворотні осі володіють двома ступенями свободи. Одна з осей є основною і закріплюється відносно поверхні землі, а друга розглядається як вторинна.

3. Серед типів систем управління треками можна виділити такі: пасивна – орієнтація панелей на Сонце виконується за сонячним календарем/годинником. Вона забезпечує приріст ефективності до 39% у порівнянні зі статичною. Активна – орієнтація виконується за допомогою сенсора освітлення. Приріст досягає 49% у порівнянні з статичною системою. Комбінована це поєднання активної і пасивної систем. Цей варіант є найбільш актуальним, оскільки суміщує у собі переваги першої та другої систем.

4. Розроблено пристрій для керування двоосним треком перетворювача сонячної енергії на базі мікроконтролера Arduino UNO та використанням акселерометра MPU-6050 і годинника реального часу. Результати експериментів з порівняння кількості енергії, виробленої нерухомою сонячною панеллю та панеллю на треку, показують, що збільшення продуктивності складає усього 19,4 %, хоча аналіз літературних даних свідчить, що двоосні треки підвищують продуктивність сонячних елементів на 40-50%. Це можна пояснити тим, що дослідження проводилися у зимових умовах в грудні місяці, коли потік енергії від сонця найнижчий.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Сонячний трекер. Електронний ресурс. Режим доступу: <https://solarsystem.com.ua/blog/zbilshennya-produktyvnosti-sonyachnyh-panelej-sonyachnyj-treker/>. Дата доступу: 16.11.2019 15:54.
2. Алфёров Ж.И., Андреев В.М., Румянцев В.Д.. Тенденции и перспективы развития солнечной фотоэнергетики // Физика и техника полупроводников. - Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук. – 2004. – Т. 38, № 8. – С. 194021 – 194026
3. Державне агентство енергоефективності України. Електронний ресурс. Режим доступу: <https://saee.gov.ua/uk/ae/sunenergy>. Дата доступу: 18.11.2019 14:25.
4. Сонячна батарея - будова і принцип роботи. Електронний ресурс. Режим доступу: <https://prel.prom.ua/a315870-sonyachna-batareya-budova.html>. Дата доступу: 18.11.2019 14:40.
5. Спеціалізовані Енергетичні Технології. Електронний ресурс. Режим доступу: <https://setech.in.ua/sonachni-elektrostantsiyi-na-trekerah/>. Дата доступу: 16.11.2019 18:20.
6. Стан і перспективи розвитку сонячної енергетики. Електронний ресурс. Режим доступу: <http://energetika.in.ua/ua/books/book-5/part-1/section-2/2-1/2-1-3>. Дата доступу: 16.11.2019 20:45.
7. Одновісні трекери Електронний ресурс. Режим доступу: <http://ussolar.com.ua/ua/news/6-odnoosnye-trekery-povyshayut-effektivnost-solnechnoy-stantsii-na-15-17>. Дата доступу: 20.11.2019 15:45.
8. Ориентация солнечных панелей, слежение за солнцем, угол наклона солнечных батарей. Електронний ресурс. Режим доступу: <http://www.solarhome.ru/basics/pv/techtilt.htm>. Дата доступу: 20.11.2019 18:15.
9. Rizman Z. et al. Smart multi-application energy harvester using Arduino // J. Fundam. Appl. Sci. – 2018. – № 10. – P. 689 – 704.



10. DS3231 arduino подключение – часы реального времени. Электронный ресурс. Режим доступа: <http://usilitelstabo.ru/ds3231-arduino-podklyuchenie.html>  
Дата доступа: 17.11.2019 20:20.

11. Marne N.S., Nagmode M.S., Komati R.D. Vibration Measurement System with Accelerometer Sensor Based on ARM // Int. J. Emerg. Technol. Adv. Eng. – 2014. – V. 4, № 4. P. – 760 – 764.

12. Сонячні трекери. Электронный ресурс. Режим доступа:  
<https://avtonomny-dom.ru/solnechnyie-batarei/solnechnyie-trekeryi.html>.  
Дата доступа: 17.11.2019 18:15.

13. Grover R. Competition-Based Approach for Undergraduate Mechatronics Education Using the Arduino Platform / International Conference of Teaching. Assessment and Learning. – Bangkok : Chulalongkorn University, 2014. – P. 78–83.

14. Сервопривод SG90 2кг. Электронный ресурс. Режим доступа:  
<https://arduino.ua/prod416-servoprivod-sg90-2kg>. Дата доступа: 17.11.2019 18:25.

15. Arduino Uno Rev3. Электронный ресурс. Режим доступа:  
<https://arduino.ua/prod32-arduino-uno-rev3-a000066>. Дата доступа: 17.11.2019 18:25.

16. Акселерометр і гіроскоп MPU-6050 модуль 6DOF. Электронный ресурс. Режим доступа: <https://arduino.ua/prod512-akselerometr-i-giroskop-mpu-6050-modul-6dof>. Дата доступа: 17.11.2019 18:40.

17. Цифровой компас QMC5883L I2C GY-271. Электронный ресурс. Режим доступа: <https://arduino.ua/prod2692-cifrovoi-kompas-qmc5883l-i2c-gy-271>. Дата доступа: 19.11.2019 12:10.

18. Часы реального времени для Raspberry Pi и Arduino. Электронный ресурс. Режим доступа: <https://arduino.ua/prod1626-chasi-realnogo-vremeni-dlya-raspberry-pi-i-arduino>. Дата доступа: 19.11.2019 12:56.

**Додаток А**

```
void setup()
{
  Serial.begin(9600);
  // Підключення MPU6050
  while(!mpu.begin(MPU6050_SCALE_2000DPS, MPU6050_RANGE_2G))
  {
    delay(500);
  }
  // Підключення режиму шунтування
  mpu.setI2CMasterModeEnabled(false);
  mpu.setI2CBypassEnabled(true);
  mpu.setSleepEnabled(false);
  // Підключення HMC5883L
  while (!compass.begin())
  {
    delay(500);
  }
  // Установлення діапазону вимірювання
  compass.setRange(HMC5883L_RANGE_1_3GA);
  // Установлення діапазону вимірювання
  compass.setMeasurementMode(HMC5883L_CONTINUOUS);
  // Установлення швидкості передачі даних
  compass.setDataRate(HMC5883L_DATARATE_30HZ);
  // Установлення кількості результатів в середньому
  compass.setSamples(HMC5883L_SAMPLES_8);
}
void loop()
{
```

```
Vector mag = compass.readRaw();  
// Визначення мінімального і максимального значень  
if (mag.XAxis < minX) minX = mag.XAxis;  
if (mag.XAxis > maxX) maxX = mag.XAxis;  
if (mag.YAxis < minY) minY = mag.YAxis;  
if (mag.YAxis > maxY) maxY = mag.YAxis;  
// Розрахунок зміщення  
offX = (maxX + minX)/2;  
offY = (maxY + minY)/2;  
Serial.print(mag.XAxis);  
Serial.print(":");  
Serial.print(mag.YAxis);  
Serial.print(":");  
Serial.print(minX);  
Serial.print(":");  
Serial.print(maxX);  
Serial.print(":");  
Serial.print(minY);  
Serial.print(":");  
Serial.print(maxY);  
Serial.print(":");  
Serial.print(offX);  
Serial.print(":");  
Serial.print(offY);  
Serial.print("\n");  
}
```

## Додаток Б

```
tmElements_t tm;
void setup() {
  bool parse=false;
  bool config=false;
  // Підключення дати та часу запуску компілятора
  if (getDate(__DATE__) && getTime(__TIME__)) {
    parse = true;
    // Налаштування годинника реального часу з наступною інформацією
    if (RTC.write(tm)) {
      config = true;
    }
  }
  Serial.begin(9600);
  while (!Serial) ; // Налаштування інформації для виводу
  delay(200);
  if (parse && config) {
    Serial.print("DS3231 налаштований час=");
    Serial.print(__TIME__);
    Serial.print(", Дата=");
    Serial.println(__DATE__);
  } else if (parse) {
    Serial.println("DS3231 помилка зв'язку :-{");
    Serial.println("Будь-ласка, перевірте вашу схему");
  } else {
    Serial.print("Не вдалося розібрати інформацію з компілятора, Час=\"");
    Serial.print(__TIME__);
    Serial.print("\", Date=\"");
    Serial.print(__DATE__);
```

```

    Serial.println("\n");
}
}
void loop() {
}
bool getTime(const char *str)
{
    int Hour, Min, Sec;
    if (sscanf(str, "%d:%d:%d", &Hour, &Min, &Sec) != 3) return false;
    tm.Hour = Hour;
    tm.Minute = Min;
    tm.Second = Sec;
    return true;
}
bool getDate(const char *str)
{
    char Month[12];
    int Day, Year;
    uint8_t monthIndex;
    if (sscanf(str, "%s %d %d", Month, &Day, &Year) != 3) return false;
    for (monthIndex = 0; monthIndex < 12; monthIndex++) {
        if (strcmp(Month, monthName[monthIndex]) == 0) break;
    }
    if (monthIndex >= 12) return false;
    tm.Day = Day;
    tm.Month = monthIndex + 1;
    tm.Year = CalendarYrToTm(Year);
    return true;
}

```