

Міністерство освіти і науки України  
Державний вищий навчальний заклад  
"Національний гірничий університет"

Електротехнічний факультет

Кафедра Відновлюваних джерел енергії

ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА  
дипломного проекту  
Магістрська дисертація

галузь знань 14 – Електрична інженерія

спеціальність 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханік  
(Нетрадиційні та відновлювані джерела енергії)

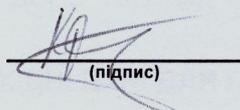
освітній рівень магістр

кваліфікація 2143.2 Інженер-електрик в енергетичній  
сфері

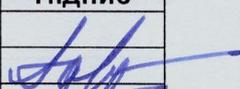
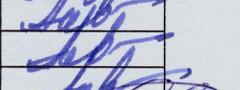
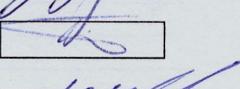
на тему Системи орієнтування фотоелектричних панелей сонячної  
електростанції.

Виконавець:

студент II курсу, групи 141М-16-3

  
(підпис)

Краснощок П. М.  
(прізвище та ініціали)

Керівники/консультанти	Прізвище, ініціали	Оцінка	Підпис
Проекту			
розділів:			
Розділ 1	Іващенко О.Б.	добре	
Розділ 2	Іващенко О.Б.	добре	
Розділ 3	Іващенко О.Б.	добре	
Техніко-економічне обґрунтування	Тимошенко Л.В.	добре	
Рецензент	Борозан В.А.	добре	
Нормоконтроль	Ципленков Д.В.	добре	

Дніпропетровськ  
2018  
Міністерство освіти і науки України  
Державний вищий навчальний заклад  
"Національний гірничий університет"

ЗАТВЕРДЖЕНО:  
завідувач кафедри

Відновлюваних джерел енергії

(повна назва)

Шкрабець Ф.П.

(прізвище, ініціали)

(підпис)

" 24 "

січня 2018 року

### ЗАВДАННЯ

на виконання кваліфікаційної роботи магістра (магістерської дисертації)

спеціальності

141 – Електроенергетика, електротехніка та  
електромеханіка

(Нетрадиційні та відновлювані джерела енергії)

студенту групи

141М-16-3  
(група)

Краснощоку Павлу Михайловичу  
(прізвище та ініціали)

Тема магістерської  
дисертації

сонячної електростанції.

Системи орієнтування фотоелектричних панелей

#### 1 ПІДСТАВИ ДЛЯ ПРОВЕДЕННЯ РОБОТИ

Наказ ректора ДВНЗ "НГУ" від 31 жовтня 2017 р № 1806-л

#### 2 МЕТА ТА ВИХІДНІ ДАНІ ДЛЯ ПРОВЕДЕННЯ РОБІТ

Об'єкт досліджень технологія поглинання сонячної енергії  
фотоелектричними панелями

Предмет досліджень двоосева система орієнтування на  
базі еліпсоїда

Мета НДР розробити у вигляді найкращої електричної  
системи орієнтування фотоелектричних панелей  
для міста Дніпро.

Вихідні дані для проведення роботи трекерів у вигляді, дані з  
сонячної інсоляції на території України

#### 3 ОЧІКУВАНІ НАУКОВІ РЕЗУЛЬТАТИ

Наукова новизна розробити у вигляді найкращої електричної  
системи орієнтування на базі еліпсоїда

орієнтування автомобіля для використання в м. Дніпро

Практична цінність полягає у запропонованні системи орієнтування автомобіля для м. Дніпро що надасть можливість зберігати більше енергії сонця

#### 4 ВИМОГИ ДО РЕЗУЛЬТАТІВ ВИКОНАННЯ РОБОТИ:

---

---

---

---

#### 5 ЕТАПИ ВИКОНАННЯ РОБІТ

Найменування етапів робіт	Строки виконання робіт (початок-кінець)
Виконання першого розділу	05.09.17 - 02.10.17
Виконання другого розділу	03.10.17 - 23.10.17
Виконання третього розділу	24.10.17 - 11.12.17
Виконання економічної частини	12.12.17 - 18.01.18

#### 6 РЕАЛІЗАЦІЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ТА ЕФЕКТИВНІСТЬ

Економічний ефект : використання системи орієнтування надасть змогу зберігати більше енергії яку можна використати в черговий раз використавши. Для власних потреб

Соціальний ефект полягає в покращенні екології середовища

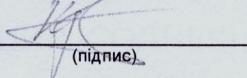
#### 7 ДОДАТКОВІ ВИМОГИ

Завдання видав

  
(підпис)

✓ Званов О.В.  
(прізвище, ініціали)

Завдання прийняв до виконання

  
(підпис)

Краснощук П.М.  
(прізвище, ініціали)

Дата видачі завдання: 04.09.2017

Термін подання дисертації до ЕК 22.01.2018

## РЕФЕРАТ

Пояснительная записка: страниц 95, 22 таблицы, 30 рисунков, 39 источников.

Объект разработки: двухосная система ориентирования солнечных батарей.

Цель дипломной работы: определить наиболее эффективный способ ориентации солнечных батарей и предложить его реализацию.

Во введении описывается состояние проблемы, предлагаются способы, которыми можно обеспечить увеличение количества поглощаемой энергии солнечной батареей.

В первом разделе обосновано использование системы ориентирования солнечных панелей для более эффективного использования солнечной энергии, исследовано влияние различных факторов на эффективность потребления солнечной энергии.

Во втором разделе производится расчет эффективности различных систем ориентирования солнечных панелей на основании факторов, соответствующих городу Днепр. Определена наиболее эффективная и целесообразная для использования система ориентирования.

В третьем разделе приводится выбор оборудования и комплектующих для системы ориентирования, предлагается алгоритм работы системы, оценивается эффективность и работоспособность выбранных элементов.

В экономическом разделе рассчитана стоимость создания установки с учетом всех затрат на приобретение оборудования и комплектующих и оплату рабочих. Кроме этого рассчитаны ежегодные затраты на обслуживание и ремонт оборудования, а также амортизация потраченных средств.

СИСТЕМА ОРИЕНТИРОВАНИЯ, СОЛНЕЧНЫЙ ТРЕКЕР, СОЛНЕЧНАЯ БАТАРЕЯ, ГЕЛИОТРЕКЕР, СОЛНЕЧНАЯ ИНСОЛЯЦИЯ.

## ABSTRACT

Explanatory note: 95 pages, 22 tables, 30 figures, 39 sources.

The object of development: a two-axis system for orienting solar cells.

The purpose of the thesis: to determine the most effective way to orient solar cells and to offer its implementation.

The introduction describes the state of the problem, suggests ways that you can ensure an increase in the amount of energy absorbed by the solar battery.

The first section substantiates the use of the solar panel orientation system for more efficient use of solar energy, the influence of various factors on the efficiency of solar energy consumption is investigated, and the installation methods, composition and principles of the orientation systems are described.

The second section calculates the effectiveness of various systems of orientation of solar panels on the basis of factors that correspond to the city of the Dnieper. The most effective and feasible orientation system is used.

In the third section, the choice of equipment and components for the orientation system is given, the algorithm of the system operation is proposed, the efficiency and efficiency of the selected elements is evaluated.

In the economic section, the cost of creating an installation is calculated taking into account all the costs of purchasing equipment and components and paying workers. In addition, annual costs are calculated for maintenance and repair of equipment, as well as depreciation of spent funds.

ORIENTATION SYSTEM, SOLAR TRACKER, SOLAR BATTERY, HELIOTREKER, SOLAR INSULATION.

## РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка: 95 сторінок, 22 таблиць, 30 рисунків, 39 джерел.

Об'єкт розробки: система орієнтування сонячних батарей.

Мета дипломної роботи: визначити найбільш ефективний спосіб орієнтації сонячних батарей і запропонувати його реалізацію.

У вступі описується стан проблеми, пропонуються способи, якими можна забезпечити збільшення кількості енергії, що поглинається сонячною батареєю.

У першому розділі обґрунтовано використання системи орієнтування сонячних панелей для більш ефективного використання сонячної енергії, досліджено вплив різних чинників на ефективність споживання сонячної енергії, а також описані способи установки.

У другому розділі проводиться розрахунок ефективності різних систем орієнтування сонячних панелей на основі чинників, що відповідають місту Дніпро. Визначено найбільш ефективну і для використання систему.

У третьому розділі наводиться вибір обладнання та комплектуючих для системи орієнтування, пропонується алгоритм роботи системи, оцінюється ефективність і працездатність вибраних елементів.

В економічному розділі розрахована вартість створення установки з урахуванням всіх витрат на придбання обладнання та комплектуючих і оплату робітників. Крім цього розраховані щорічні витрати на обслуговування і ремонт обладнання, а також амортизація витрачених коштів.

СИСТЕМА ОРІЄНТУВАННЯ, СОНЯЧНИЙ ТРЕКЕР, СОНЯЧНА БАТАРЕЯ, ГЕЛІОТРЕКЕР, СОНЯЧНА ІНСОЛЯЦІЯ

## СОДЕРЖАНИЕ

Введение.....	
1. Анализ способов и средств ориентации солнечных панелей.....	
1.1. Актуальность исследуемой проблемы.....	
1.2. Обоснование использования солнечного трекера .....	
1.3. Влияние угла наклона солнечных панелей на эффективность работы	
1.4. Влияние внешних факторов на эффективность работы солнечных	
панелей .....	
1.5. Способы ориентации солнечных панелей .....	
1.6. Состав солнечного трекера .....	
1.7. Принцип работы трекера.....	
1.8. Выводы по разделу.....	
2. Исследование эффективности систем ориентирования.....	
2.1. Рациональное использование энергии солнца .....	
2.2. Математическая модель работы ФМ .....	
2.2.1 Угол склонения Солнца.....	
2.2.2 Часовой угол.....	
2.2.3 Мощность солнечных панелей.....	
2.3. Подробный расчет.....	
2.4. Выводы по разделу.....	
3. Обоснование конструкции двухосной системы ориентирования	
солнечных панелей .....	
3.1. Выбор разрабатываемого объекта .....	
3.2. Конструктивное исполнение установки .....	
3.3. Влияние угла наклона солнечных панелей на эффективность работы	
3.4. Расчет моментов инерции конструкции .....	
3.5. Повышение живучести и надежности функционирования АСУ	
слежения при действии ветровой нагрузки .....	
3.6. Состав солнечного трекера .....	

3.7. Разработка алгоритма слежения за солнцем.....	
3.8. Расчет фотоэлементов и узлов связи.....	
3.9. Выбор и расчет платы управления.....	
3.10. Выводы по разделу.....	
4. Экономический раздел .....	
4.1 Обоснование и задачи экономического расчета .....	
4.2 Расчет стоимости двухосной системы ориентирования солнечных панелей.....	
4.3 Эксплуатационные расходы.....	
4.3.1 Расчет амортизационных отчислений.....	
4.3.2 Затраты на техническое обслуживание и текущий ремонт оборудования. ....	
4.4 Годовая экономия.....	
4.5 Расчет срока окупаемости .....	
4.6 Выводы по разделу.....	
Заключение.....	
Список использованной литературы.....	

## ВВЕДЕНИЕ

С развитием цивилизации население земли нуждалось в дополнительной энергии. Причём чем дальше, тем больше. В настоящее время люди желают осваивать всё новейшие источники энергии. Одним из таких источников является альтернативная энергетика. С течением времени менялось определение предоставленного вида энергии, а дискуссии в связи с его внедрением не утихают до сих пор. В общем значении, альтернативная энергетика, как в настоящее время она задумана, это то, что вырабатывается без вредоносных последствий, присущих применению ископаемого горючего. В частности, высочайшим уровнем выбросов диоксида углерода (парниковых газов), что является принципиальной причиной глобального потепления.

Одним из направлений в другой энергетике является гелиоэнергетика.

В этот момент непрерывно развиваются технологии, какие употребляют ясный свет и его тепло. К таким технологиям относятся выработка фотоэлектричества и внедрение солнечной тепловой энергии.

Гелиоэнергетика является принципиальным родником восстанавливаемой солнечной энергии, которую разрешено применять функциональным либо пассивным методом. С одной стороны, используя функциональный метод применения предоставленного вида энергии, может производить электричество в фотоэлектрических системах. С иной стороны, применять этот вид энергии при строительстве построек, акцентируя свой интерес на выборе материалов, имеющих полезную для нас теплоёмкость либо владеющих важными дисперсионными качествами. Ещё разрешено направлять сооружение к Солнцу и применять это при проектировании площадей, когда мы желаем достигнуть натуральной циркуляции воздуха либо подходящей освещенности помещения.

Одним из видов внедрения гелиоэнергетики является фотоэлектричество (фотовольтаика, от англ. photovoltaic, PV).

Фотоэлектричеством имеются способы преобразования солнечной энергии в электричество постоянного тока с внедрением полупроводниковых материалов, какие проявляют фотоэлектрический результат, явление традиционно исследуются в области физики, фотохимии и электрохимии. Этот результат разъясняется действием фотонов (частиц света), владеющих нужной энергией (длиной волны), на электроны полупроводникового вещества (традиционно, кремния), в итоге происходит их «вырывание» и издание, что приводит к происхождению фототока (либо электрического тока). В частности, это именуется наружным фотоэффектом.

Для того чтобы нарастить емкость установки, использующей явление наружного фотоэффекта, пластинки кремния (солнечные составляющих), как правило, соединяют в модули, именуемые солнечными батареями.

Солнечные батареи вырабатывают гальванический ток под действием солнечного света. Электроэнергия в свою очередность может существовать ориентирована на питание оборудования и/или для подзарядки аккумулятора.

Главным практичным использованием солнечных батарей было питание орбитальных спутников и остальных космических аппаратов, а на нынешний день большая часть фотоэлектрических модулей употребляется для выработки электроэнергии в быту и для индустриальных компаний.

Есть некие приёмы, какие имеют все шансы посодействовать прирастить продуктивность солнечных батарей и заполучить более солнечной энергии. Первый приём – это прослеживать точку наибольшей мощности, а второй – прослеживать расположения Солнца.

Отслеживание точки наибольшей мощности (ОТММ, англ. maximum power point tracking, MPPT) выполняются с поддержкой особых контроллеров ОТММ, какие встраиваются в большинство современных солнечных инверторов. Сущность этого способа содержится в том, что контроллер исследует вольт-амперную характеристику (ВАХ) солнечной батареи для нахождения рационального режима работы, при котором предоставленной освещенности станет возбуждаться наибольшее число энергии.

Смотреть за положением Солнца разрешают солнечные трекеры, о которых и станет идти речь в предложенной работе.

Выработка энергии благодаря применению солнечного трекера возрастает, так как увеличивает численность солнечной энергии, попадающей на модуль.

Для преобразования солнечной энергию в электрическую используется солнечная панель. Солнечная панель обеспечивает питанием контроллер заряда, который в свою очередь накапливает энергию в аккумуляторных батареях. Так как наиболее эффективное использование солнечной энергии достигается направление лучей перпендикулярно солнечной панели. Необходимо вращать ее в различные направления в зависимости от времени суток. Для этого используется солнечный трекер. Солнечный трекер состоит из механической системы передвижений, шагового двигателя и электронной системы контроля шаговым двигателем.

## РАЗДЕЛ 1. АНАЛИЗ СПОСОБОВ И СРЕДСТВ ОРИЕНТАЦИИ СОЛНЕЧНЫХ ПАНЕЛЕЙ

### 1.1 Актуальность исследуемой проблемы

Результаты проведенных исследований по оценке использования солнечного излучения для целей энергетики [1,2] свидетельствуют об экономической неэффективности и коммерческой непривлекательности фотоэлектрических модулей (далее ФМ) в современных ценовых условиях. Снижение стоимости производства электроэнергии возможно двумя способами: снижение стоимости ФМ и повышение эффективности сбора энергии.

Реализация первого способа возможна следующими путями: удешевлением производства - цеха автоматического производства фотоэлектрических модулей; удешевлением материала гелиоприемника [3,4].

Что касается второго способа, повысить эффективность можно применяя следующие методы:

- использовать многослойные фотоприёмники на гетеропереходах, однако их стоимость гораздо выше обычных, поэтому соотношение цена/эффективность фактически не меняется;
- применять двусторонние фотоэлектрические преобразователи, что незначительно увеличивает эффективность при значительном увеличении цены;
- добавлять различные концентраторы, которые увеличивают фотоответ, но фотоэлементы при этом греются, что негативно сказывается на их КПД и сроке службы;

- оборудовать фотоэлементы системой слежения за Солнцем, что даёт наилучшее соотношение стоимость/эффективность. [5].

На данном этапе развития солнечной энергетики наиболее пристальное внимание следует уделить последнему варианту. Величиной, оказывающей влияние на выработанную мощность фотоэлектрических модулей, является угол падения солнечных лучей на ее поверхность, даже при самой эффективной стационарной установке фотоэлектрических модулей проигрыш в вырабатываемой мощности составляет до 50%, чем при непрерывном ориентировании на Солнце [6,7]. Применение систем слежения позволит изменять угол наклона фотоэлектрических модулей в течение дня таким образом, чтобы сохранять прямой угол падения солнечных лучей на его поверхность. Это позволит увеличить количество пришедшей мощности, а, следовательно, и количество вырабатываемой мощности. Данный способ подходит для уже работающих СЭС, для этого требуется только изменить опорную конструкцию.

## **1.2 Обоснование использования солнечного трекера**

Солнечный трекер (Solar tracker) — устройство, предназначенное для отслеживания положения солнца и ориентирования несущей конструкции таким образом, чтобы получить максимальный КПД от солнечных батарей (или других устройств, установленных на трекере). Концепция трекера предельно проста — по нескольким датчикам контроллер определяет оптимальное положение для солнечной батареи и заставляет серводвигатель поворачивать платформу с устройством в необходимую сторону.

В разрезе использования таких устройств в фотоэлектрических системах, трекеры применяются для отслеживания положения солнца и периодического поворота солнечных панелей для максимизации выработки электроэнергии на протяжении дня.

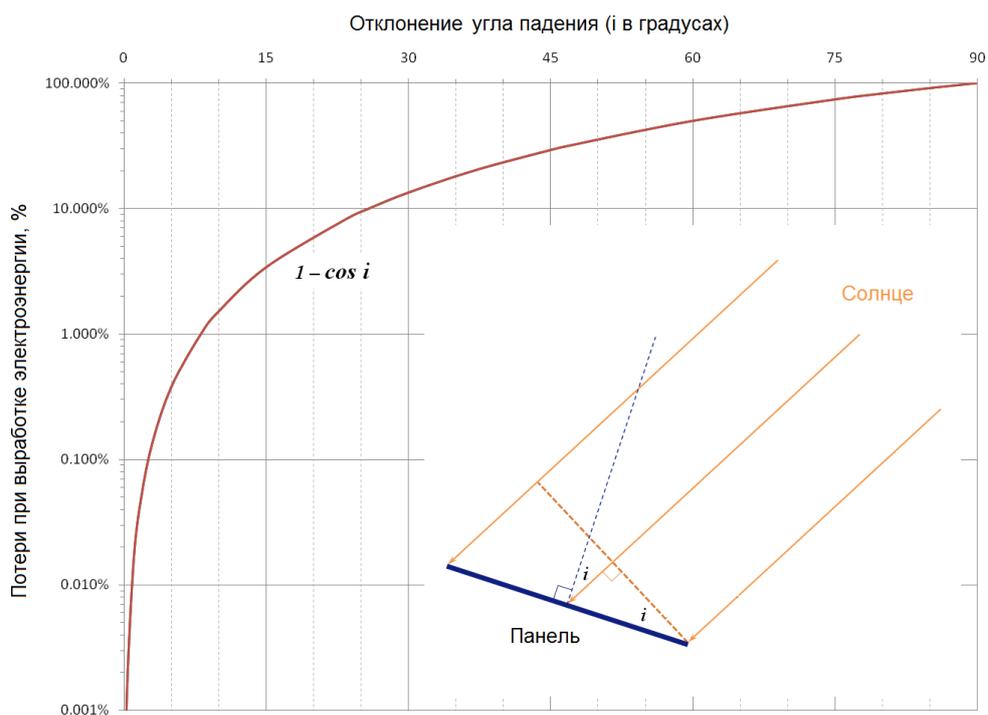


Рис 1.1 Зависимость величины потерь при выработке электроэнергии солнечными панелями от величины угла

Данный график отображает зависимость величины потерь при выработке электроэнергии солнечными панелями от величины угла отклонения от оптимального положения плоскости панели. Из графика зависимости видно, что трекер с точностью  $\pm 5^\circ$  обеспечивает улавливание панелью более 99,6% энергии прямых лучей и 100% — от рассеянного света.

Учитывая особенности ежедневной траектории движения солнца можно сказать, что эффективный угол поворота панелей — около  $150^\circ$ . Панель, которая зафиксирована в направлении ровно по середине между точками заката и восхода теряет до 75% от максимально возможной выработки в утреннее и вечернее время.

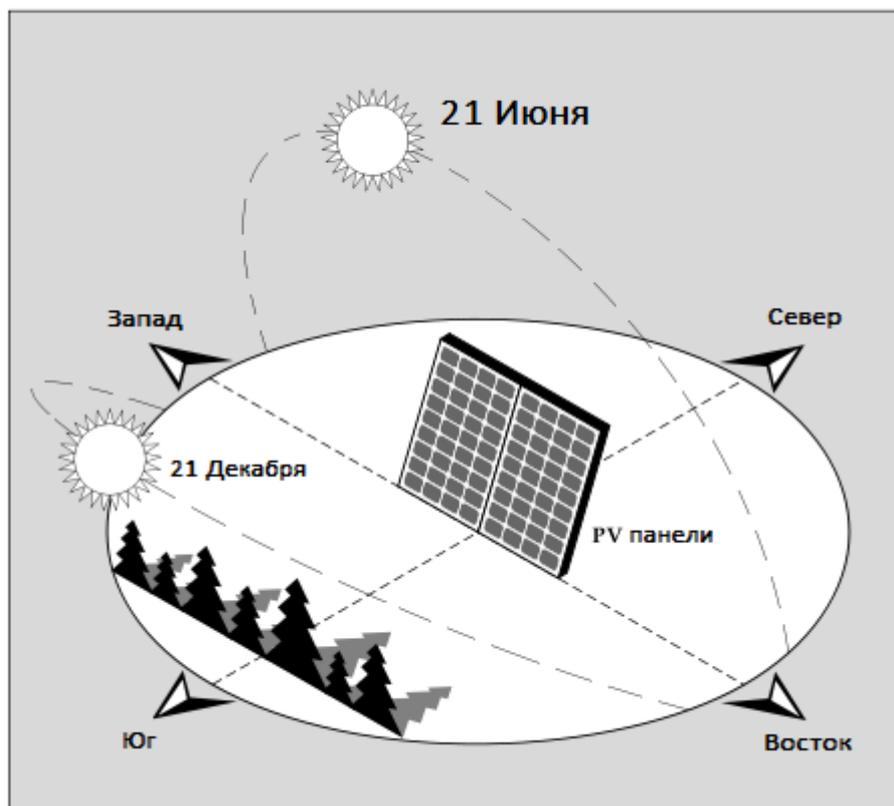


Рис. 1.2 Ориентация панели в по направлению

Вращение панели от востока к западу для минимизации этих потерь называют однокоординатным слежением. Кроме дневного движения с востока на запад солнце совершает сезонное перемещение между северной и южной сторонами света на  $46^\circ$ . Для того чтобы учитывать эти изменения необходимо двух координатное слежение.

Трекеры для солнечных батарей бывают нескольких конфигураций, руководствуются различными алгоритмами при выборе направления, имеют разные приводные механизмы. Несмотря на массу возможных различий между трекерами, чаще всего они делятся на два типа — однокоординатные и двухкоординатные. [8]

Трекеры необходимы для ориентации рабочей поверхности на солнце. Рабочей поверхностью в данном случае выступают:

— батарея, состоящая из солнечных фотоэлектрических модулей (панелей);

— зеркало параболического отражателя, фокусирующего солнечную энергию на двигателе Стирлинга, вырабатывающего электричество;

— зеркало отражателя, фокусирующего солнечную энергию на любой другой приёмник солнечной энергии, которым может выступать устройство или теплоноситель, в зависимости от типа системы .

— оптические устройства и др.

Точная ориентация рабочих поверхностей систем на Солнце необходима для достижения их максимальной производительности. При этом задача трекера — уменьшить угол падения солнца на рабочую поверхность солнечных панелей (PV-модулей, CPV-концентрированных фотоэлектрических модулей, CSP систем, HCPV систем, параболических отражателей и др.).

### **1.3 Влияние угла наклона солнечных панелей на эффективность работы.**

Солнечные панели наиболее эффективно работают, когда они направлены на солнце и их поверхность перпендикулярна солнечным лучам. Солнечные панели обычно располагаются на крыше или поддерживающей конструкции в фиксированном положении и не могут следить за положением солнца в течение дня. Поэтому, обычно солнечные панели не находятся под оптимальным углом (90 градусов) в течение всего дня. Угол между горизонтальной плоскостью и солнечной панелью обычно называют углом наклона.

Вследствие движения Земли вокруг Солнца, имеют место также сезонные вариации. Зимой солнце не достигает того же угла, как летом. В идеале, солнечные панели должны располагаться летом более горизонтально, чем зимой. Поэтому угол наклона для работы летом выбирается меньше,

чем для работы зимой. Если нет возможности менять угол наклона дважды в год, то панели должны располагаться по оптимальным углом, значение которого лежит где-то посередине между оптимальными углами для лета и зимы. Для каждой широты есть свой оптимальный угол наклона панелей. Только для местностей около экватора солнечные панели должны располагаться горизонтально.

Обычно принимается для весны и осени оптимальный угол наклона равным значению широты местности. Для зимы к этому значению прибавляется 10-15 градусов, а летом от этого значения отнимается 10-15 градусов. Поэтому обычно рекомендуется менять дважды в год угол наклона с "летнего" на "зимний". Если такой возможности нет, то угол наклона выбирается примерно равным широте местности.

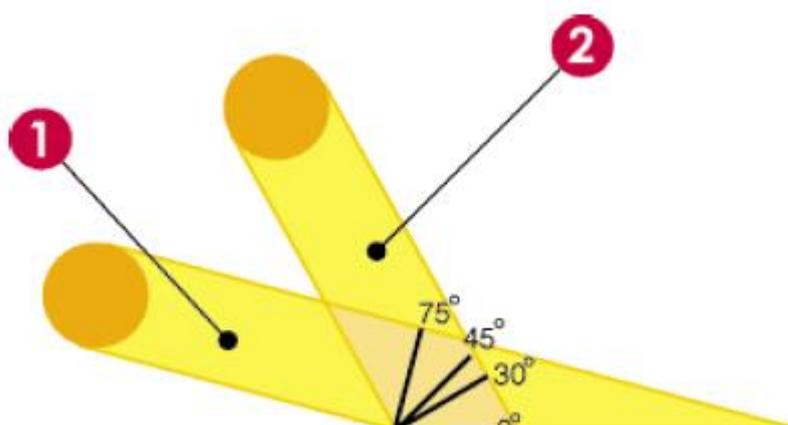


Рисунок 1.3 - Оптимальный угол наклона зимой и летом.

1. Солнце зимой.
2. Солнце летом

Небольшие отклонения до 5 градусов от этого оптимума оказывают незначительный эффект на производительность модулей. Различие в погодных условиях более влияет на выработку электричества. Для

автономных систем оптимальный угол наклона зависит от месячного графика нагрузки, т.е. если в данном месяце потребляется больше энергии, то угол наклона нужно выбирать оптимальным именно для этого месяца. Также, нужно учитывать, какое есть затенение в течение дня. Например, если с восточной стороны у вас дерево, а с западной все чисто, то, скорее всего, имеет смысл сместить ориентацию с точного юга на юго-запад.

Таблица 2.1 - Потери выработки вследствие отражения(в процентах к перпендикулярному направлению на модуль)

Угол падения лучей света	Потери
9	1.2%
18	4.9%
40	19.0%
45	29.0%

## 1.4 Влияние внешних факторов на эффективность работы солнечных панелей

Солнечный свет проходит свой путь от Солнца до Земли по прямой линии. Когда он достигает атмосферы, часть света преломляется, а часть достигает земли по прямой линии. Другая часть света поглощается атмосферой. Преломленный свет - это то, что обычно называется диффузной радиацией, или рассеянным светом. Та часть солнечного света, которая достигает поверхности земли без рассеяния или поглощения - это прямая радиация. Прямая радиация - наиболее интенсивная.

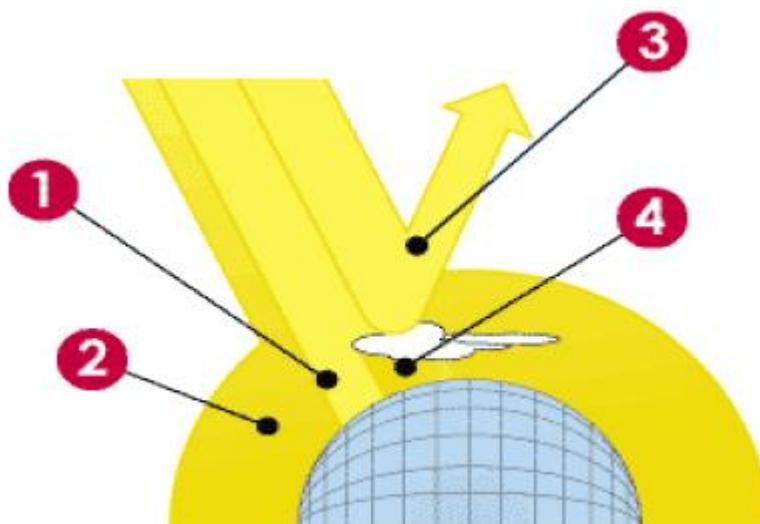


Рисунок 1.4 - Излучения поверхности земли:

1. прямая; 2. поглощение; 3. отражение; 4. непрямая.

Солнечные модули производят электричество даже когда нет прямого солнечного света. Поэтому, даже при облачной погоде фотоэлектрическая система будет производить электричество. Однако, наилучшие условия для генерации электроэнергии будут при ярком солнце и при ориентации панелей перпендикулярно солнечному свету. Для местностей северного

полушария панели должны быть ориентированы на юг, для стран южного полушария - на север.

Таблица 1.2 - Влияние различных световых условий на выработку фотоэлектрических модулей (в % от полной мощности)

Условие	% от "полного" солнца
Яркое солнце - панели расположены перпендикулярно солнечным лучам	100%
Легкая облачность	60-80%
Пасмурная погода	20-30%
За оконным стеклом, один слой, стекло и модуль перпендикулярны солнечным лучам	91%
За оконным стеклом, 2 слоя, стекло и модуль перпендикулярны солнечным лучам	84%
За оконным стеклом, один слой, стекло и модуль под углом 45° солнечным лучам	64%
Искусственный свет в офисе, на поверхности письменного стола	0.4%
Искусственный свет внутри яркого помещения (например, магазин)	1.3%
Искусственный свет внутри жилого помещения	0.2%

### 1.5 Способы ориентации солнечных панелей

Существует три способа контроля ориентации ФМ [10]:

1. Ручной способ, при котором наводка на Солнце производится оператором;
2. Пассивный способ, при котором поворот ФМ в течение дня производится по заданному алгоритму управления;
3. Активный способ, обеспечивающий постоянную ориентацию на максимальный поток солнечного излучения.

В системах с ручной наводкой ФМ на Солнце производится оператором. Для ориентации большого количества ФМ используется пульт управления общим приводом. Точность, а, как результат, и выработанная в течение дня мощность напрямую зависит от работы оператора: его выбора угла наклона ФМ, количества поворотов ФМ в течение дня и времени работы поворотного устройства [11].

Все пассивные системы контроля имеют один принцип работы – управление скоростью вращения ФМ, на основе расчетно-постоянных характеристиках для данного географического положения ФМ. Исходные величины для разработки алгоритма работы системы контроля являются постоянными: географическая широта местности, продолжительность дня для данной местности, изменение высоты солнцестояния в течение дня и в течение года.

Для использования таких систем необходимы данные метеослужбы для каждого конкретного местоположения ФМ и требуют перерасчета угла и скорости поворота ФМ, а, следовательно, изменения программы. Для перерасчета и перепрограммирования микроконтроллера необходима работа специалистов, что лишает ее универсальности и увеличивает стоимость установки.

Активные системы контроля получили наибольшее развитие и распространение на сегодняшний день. В отличие от пассивных систем активные ориентируют поверхность ФМ на максимальный поток солнечного излучения, другими словами на самое яркое пятно на небе. Использование таких систем наиболее экономически целесообразно и как требует наименьшего обслуживания и вмешательства.

## 1.6 Состав солнечного трекера

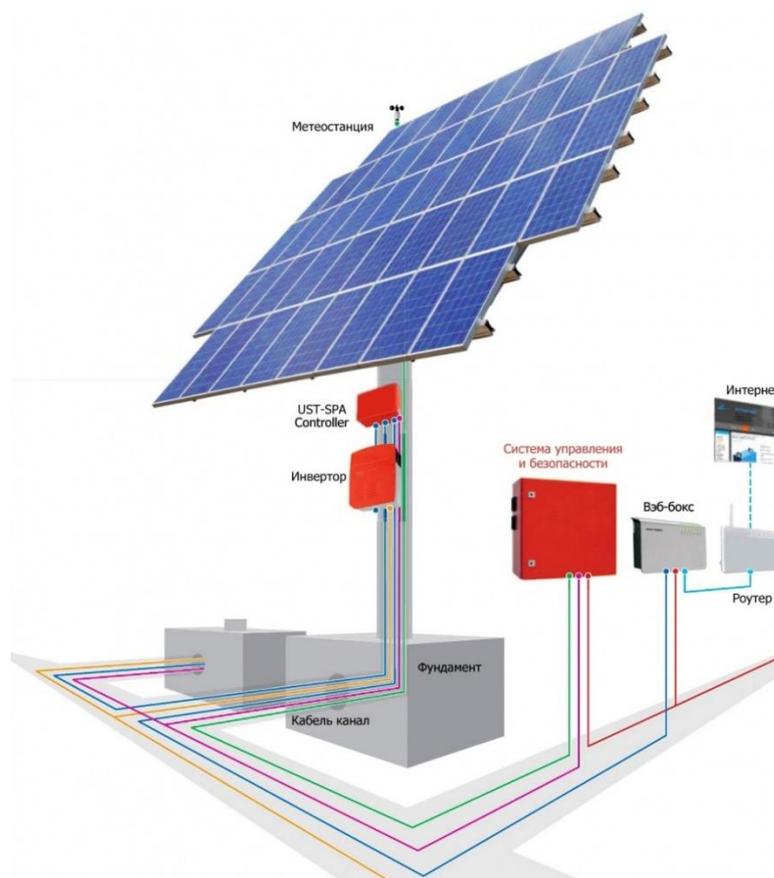


Рис 1.5 стандартный состав солнечного трекера

Солнечный трекер в полной комплектации состоит из:

1. Несущей конструкции, состоящей из фиксированной и подвижной частей, подвижная часть имеет одну или две оси вращения (Рис.1.3);

2. Системы ориентации (позиционирования) подвижной части трекера, состоящей из актуаторов, и устройства управления ими;

3. Системы безопасности, включающей в себя:

— защиту от молнии,

— защиту от перегрузок,

— метеостанцию, предназначенную для предупреждения системы об урагане, граде, снеге, наледи, неблагоприятных погодных условиях. Анализируя данные метеостанции, система переориентирует трекер в положение, при котором неблагоприятные факторы будут минимизированы в период их действия, а рабочие поверхности защищены от разрушения или порчи.

— стабилизаторы;

4. Системы управления и интерфейс, предназначенные для настройки, контроля и обслуживания энергосистемы;

5. Системы удалённого доступа — для удалённого мониторинга и управления системой;

6. Система навигации — для определения географического положения системы, высоты над уровнем моря (для трекеров на мобильной базе). На стационарных трекерах навигация не обязательна. Установочные значения широты, долготы, высоты над уровнем моря места, где ставится трекер, вводятся поставщиком при монтаже системы.

7. Инвертор - преобразует, поступающее от полезной нагрузки трекера ( PV-модулей и др.) постоянное напряжение в переменное 220В (110В) и передаёт его потребителю или на принимающую станцию, одновременно, запитывая трекер. Количество инверторов на трекере может быть от одного до трёх. Инверторы выполняются в защищенном варианте

(полевом) или же в корпусе, устанавливаемом в помещении. Схемы подключения инверторов в системе могут быть различными.

Необходимость полной комплектации трекера не всегда экономически целесообразна, зависит от вида трекера, назначения, и других факторов, поэтому в практике часто многие указанные выше составляющие элементы трекера отсутствуют.

Конструктив трекера должен обеспечивать способность выдерживать сильные ветровые нагрузки, при его работе в составе энергосистемы. С увеличением размеров рабочей поверхности полезной нагрузки увеличивается парусность комплекса. Вес полезной нагрузки тоже имеет значение. Поэтому проектировщикам часто приходится в своих решениях перераспределять нагрузки на трекер, увеличивая габариты системы. Надёжность при этом является определяющим фактором. [9]

### **1.7 Принцип работы трекера**

Подвижная часть трекера может менять своё положение с помощью ручного привода, либо с помощью 1-2-х актуаторов — исполнительных устройств, выполненных на электродвигателях.

Задача трекера — установить углы наклона рабочей поверхности нагрузки, ориентируя её строго на солнце. Проще говоря, солнечные лучи должны падать перпендикулярно плоскости солнечной батареи.

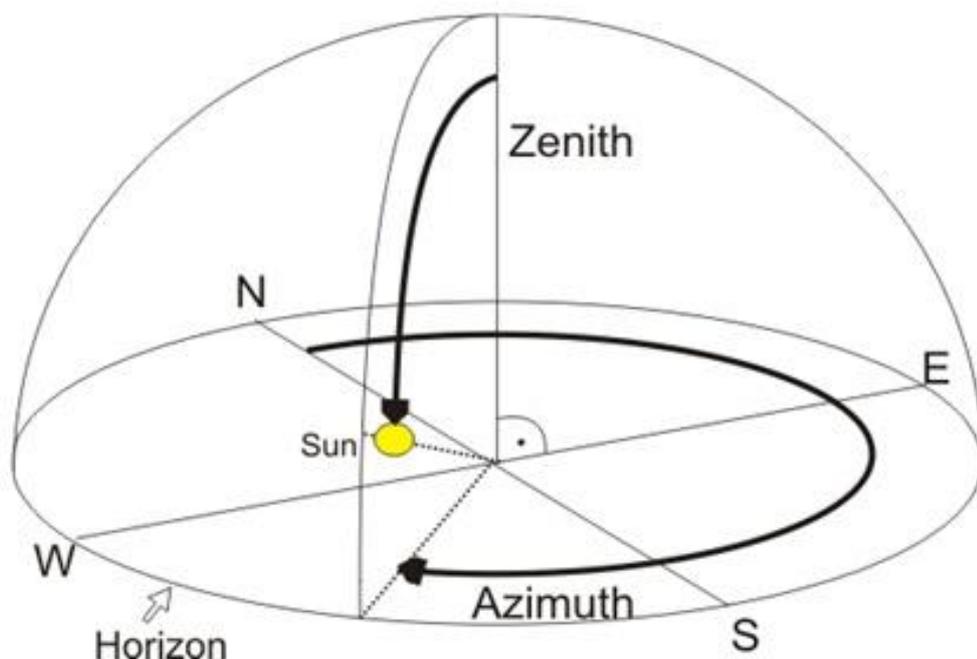


Рис 1.6 Зенит и азимут

Такой ориентации можно добиться несколькими способами:

В первом случае устройство управления актуаторами с помощью нескольких фотоприёмников анализирует освещённость при разных положениях трекера и передаёт управляющие сигналы на актуаторы до момента, когда поток света на всех фотоэлементах будет одинаков. Разбалансировка системы из-за движения солнца даст импульс для активации нового перемещения, в направлении к солнцу. Принципиальные схемы таких устройств несложные и недорогие. Но у них есть один существенный недостаток. В пасмурную погоду, при осадках и загрязнении фотоприёмников система неработоспособна.

Переориентировать систему можно вручную, либо, управляя актуаторами, подавая управляющие сигналы с помощью переключателей. Но такой способ приемлем в основном для сезонной ориентации трекеров,

когда на какой-то период времени выставляется соответствующий угол наклона (на картинке данный угол обозначен как Zenith (зенитный угол наклона солнца (Рис 1.4.)). Точность ориентации при этом невелика, постоянно оператор не может находиться у трекера, поэтому данный способ распространён мало, но для сезонной ориентации малобюджетных систем он вполне подходит.

Управление движением трекера по Азимутальному и Зенитному углам возможно устройством управления, в состав которого входит таймер. При этом актуаторы начинают свою работу по суточной программе таймера (при необходимости, и по годовой программе). Точность ориентации при этом не велика, так как солнце в течение года постоянно меняет время, место восхода и захода, зенитный угол.

К примеру, летом в наших широтах зенитный угол мал, а зимой солнце идёт по горизонту и зенитный угол велик. Данный способ приемлем для недорогих систем.

Наиболее эффективным стал способ управления актуаторами по программе, которая в определенные интервалы времени рассчитывает местоположение солнца. По внутренним часам устройства программа на блок управления будет выдавать информацию о значении Азимутального (Azimuth) и Зенитного (Zenith) углов (Рис.1.4), с учётом местоположения трекера (широта, долгота, высота над уровнем моря), после чего исполнительным устройством производится соответствующая переориентация трекера в расчётное положение. Данная программа для расчёта местоположения солнца, называется — SPA (Алгоритм солнечной позиции).

Устройства управления трекерами могут быть выполнены на защищённых компьютерах, PLC — Программируемых логических контроллерах, либо в виде отдельных законченных устройств,

программируемых поставщиком при поставке трекера, с привязкой к местности своего изделия. Группа трекеров может управляться одним компьютером, что снижает себестоимость электростанции. [12]

В разделе 3 будет предложена система ориентирования на основе гелиотрекера который определяет положение солнца по отношению к установке.

### **1.8 Выводы по разделу**

1. Обосновано использование системы ориентирования солнечных панелей для более эффективного использования солнечной энергии.
2. Исследовано влияние различных факторов на эффективность потребления солнечной энергии.
3. Приведены способы ориентации солнечного трекера, состав установки ориентирования, а также принципы его работы.

## РАЗДЕЛ 2. ИСЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ СИСТЕМ ОРИЕНТИРОВАНИЯ

### 2.1 Рациональное использование энергии солнца

Для наибольшей эффективности работы солнечных панелей, т.е. преобразования солнечной энергии в электрическую, необходимо, чтобы солнечные лучи были направлены перпендикулярно поверхности модуля. В таком случае освещенность поверхности солнечных панелей будет максимальной. Для этого необходимо, чтобы система контроля максимума освещенности в течение дня периодически изменяла положение солнечных панелей для сохранения прямого угла между направлением лучей и его плоскостью. Система, обеспечивающая поворот солнечных панелей в течение дня на максимальный поток солнечного излучения, называется системой контроля максимума освещенности солнечных панелей (далее по тексту система контроля).

Перемещение Солнца по небу в течение года и дня является входной характеристикой для системы контроля. Система контроля отвечает за ориентирование солнечных панелей на Солнце в течение дня и года, поэтому рассмотрим геометрические отношения между Солнцем и Землей. В течение года Земля описывает эллиптический путь вокруг Солнца (рисунок 1.1). Это движение является причиной изменения сезонов года и длительности светового дня. Изменение высоты Солнца на небосклоне в течение года определяется прецессией земной оси (рисунок 1.2), отвечающей за склонение оси Земли относительно плоскости эклиптики в течение года. В течение дня Земля также вращается вокруг своей оси, описывая полный круг, это движение является причиной восходов и закатов.

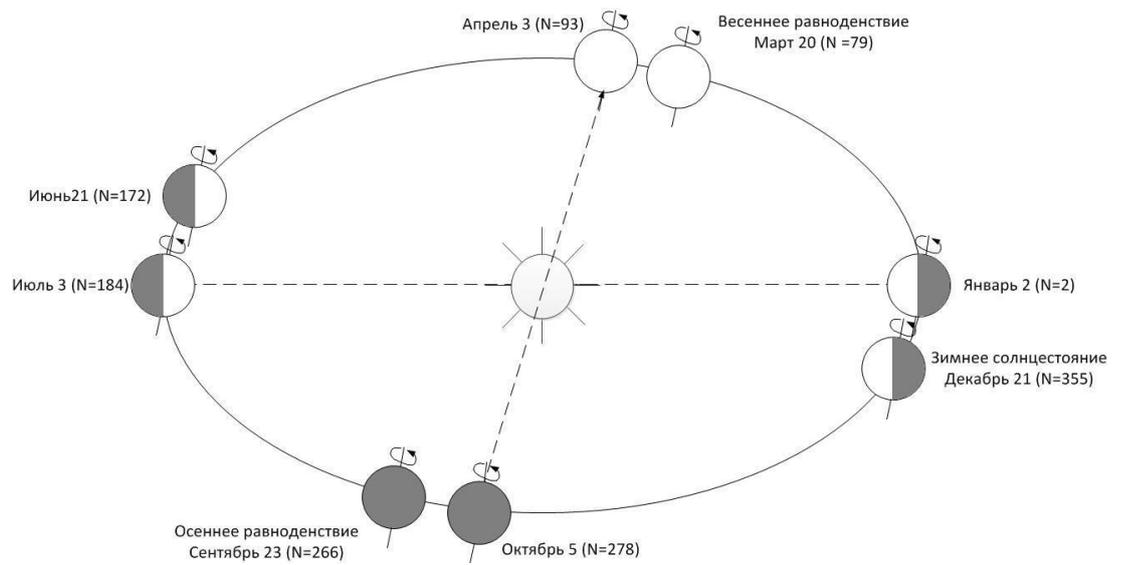


Рисунок 2.1. Вращение Земли вокруг Солнца в течение года.



Рисунок 2.2. Схематическое изображение прецессии земной оси.

За одни сутки земля поворачивается вокруг своей оси на  $360^\circ$ , однако солнечные панели будут генерировать энергию только в течение светового дня. Длительность дня меняется в зависимости от широты и места установки солнечных панелей. Необходимо проследить за двумя условиями изменения высоты Солнца: в течение дня и условия изменения высоты Солнца по временам года.

Положение Солнца на небосводе может быть описано двумя углами: азимут и зенит. Азимут - угол между истинным направлением севера и проекцией Солнца на горизонтальную плоскость Земли.

Зенитный угол характеризует высоту солнцестояния. Азимут изменяет значение в течение дня из-за вращения Земли вокруг своей оси (его также называют часовой угол), а зенитный угол изменяется из-за прецессии земной оси. Следовательно, при проектировании системы контроля необходимо принимать во внимание два вращательных движения Солнца: ежедневное движение (перемещение по оси азимута) и ежегодной прецессии земной оси (перемещение по оси эклиптики).

Существует два способа контроля положения Солнца: по одной оси и по двум. Количество осей определяет механизм системы контроля: одноосная и двухосная (рисунок 1.3).

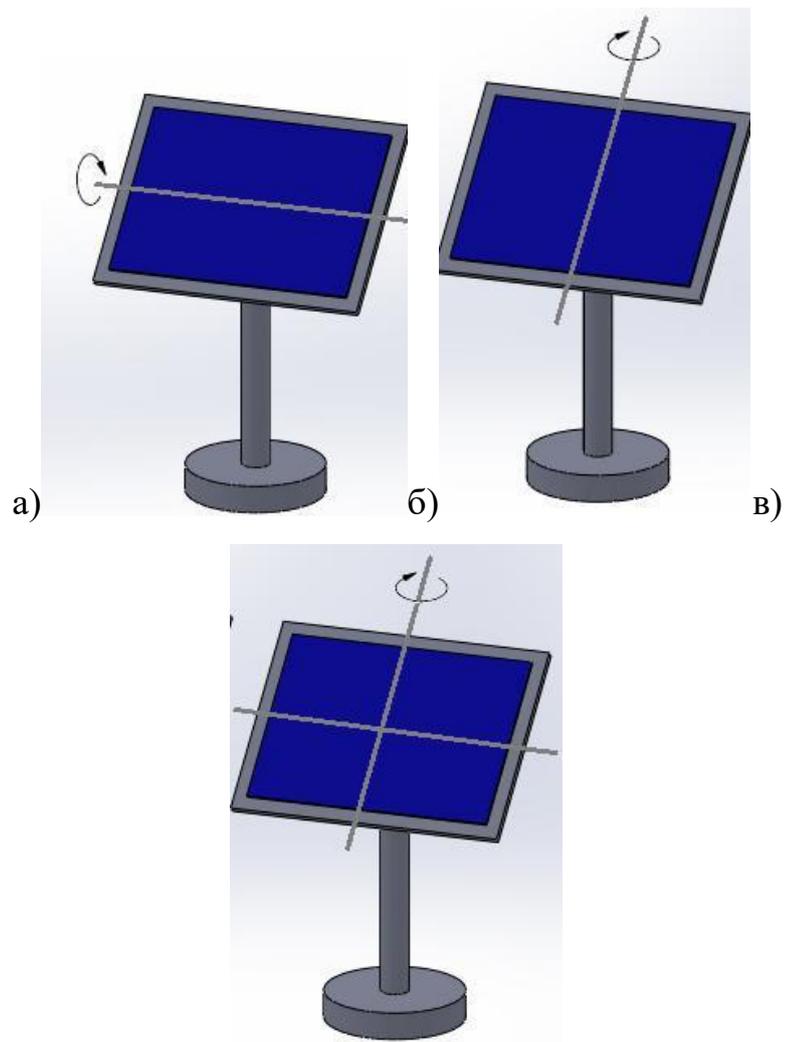


Рисунок 2.3. Системы контроля: а – одноосная азимутальная,

б – одноосная зенитальная, в – двухосная.

Одноосные системы вращают солнечные панели только в одной плоскости, осуществляющие контроль при перемещении Солнца по азимуту или эклиптике. На практике системы контроля по оси эклиптике не применяются, т.к. перемещение Солнца в течение дня по оси азимута значительно.

Для достижения большей эффективности при одноосном слежении по эклиптике вторую ось выставляют параллельно оси Земли [13], т.е. на юг под углом к горизонту, соответствующему широте местности (рисунок 1.4).

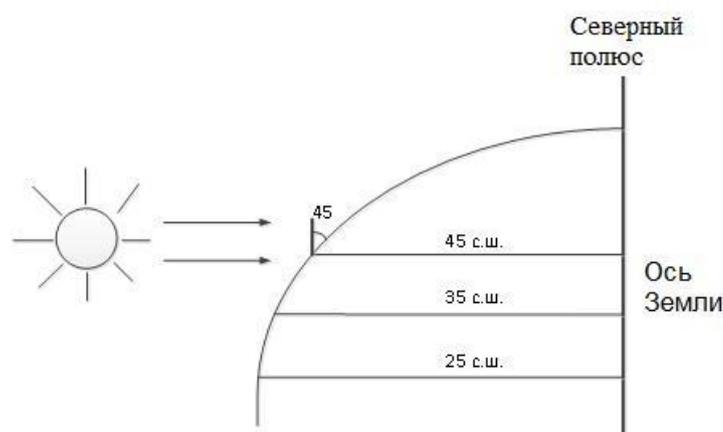


Рисунок 2.4. Расположение ФМ относительно горизонта.

Двухосные системы контролируют положение Солнца в двух плоскостях (азимуту и эклиптике Солнца), что обеспечивает точное отслеживание солнечного перемещения в течение дня.

Двухосные системы имеют большую эффективность по сравнению с одноосными, однако стоимость их гораздо выше, в связи с усложнением их конструкции и блока контроллера. Поэтому чаще используют системы с одной осью контроля, а вторую ось, как говорилось ранее, выставляют параллельно оси Земли или, для достижения большей эффективности, выставляют вручную 3-4 раза в год на наиболее эффективный угол.

## 2.2 Математическая модель работы ФМ

Проведем расчет вырабатываемой мощности солнечных панелей. Для этого сначала определим количество солнечной радиации, поступающей в течение дня. Поток прямой солнечной радиации  $Sr_{пр}$  на поверхность, расположенную под углом  $\beta$  к этому потоку равен:

$$Sr_{пр} = Sr_{max} * K_{ат} * \cos\beta \quad 2.1$$

$Sr_{max}$  – количество радиации, которое поступает от Солнца на Землю. Эта величина является солнечной константой, равной 1325Вт/м<sup>2</sup>. При расчетах нужно учитывать, что 30-35% этой энергии отражается назад в космос, поэтому возьмем  $Sr_{max} = 925\text{Вт/м}^2$ .

$\beta$ – приведенный угол падения солнечных лучей на поверхность инсоляции,

$K_{ат}$  – коэффициент поправки на воздушную массу, которую необходимо пройти лучу.

$$K_{ат} = 1.1254 - \frac{0,1366}{\sin h c} \quad (2.2)$$

$$\cos\beta = \sin h_c * \cos\alpha + \cos h_c * \sin\alpha \quad (2.3)$$

$\alpha$  – угол наклона плоскости ФМ к горизонту,  $K_{ат}$

$h_c$  – угол, который определяет высоту Солнца над горизонтом в данный момент времени.

Ось Земли отклоняется от перпендикуляра к плоскости эклиптики на угол  $23^{\circ}27'$ , поэтому половину года каждое географическое местоположение наклонено в сторону Солнца, а другую половину – от Солнца (рисунок 2.1).

В полдень дня весеннего равноденствия высота солнцестояния равна  $h=90^{\circ}-\theta$ , где  $\theta$  – географическая широта. В полдень дня летнего солнцестояния высота соответствует наибольшему значению  $h_{max}=90^{\circ}-\theta+23^{\circ}27'$  и продолжительность светового дня максимальна. Когда Солнце находится в точке осеннего равноденствия, продолжительности дня и ночи равны, а высота солнцестояния в полдень равна  $h=90^{\circ}-\theta$ , как и в день весеннего равноденствия. В полдень зимнего солнцестояния высота солнцестояния соответствует наименьшему значению  $h_{min}=90^{\circ}-\theta-23^{\circ}27'$  и продолжительность светового дня минимальна

Определим выражение для высоты солнцестояния  $h_c$ . Солнечный зенитный угол – угол между направлением вектора солнечных лучей  $S$  и зенитной осью относительно наблюдателя (рисунок 1.5). Зенитный угол  $v_z$  характеризует высоту солнцестояния  $h_c$ .

$$V_z = 90^{\circ} - h_c \quad 2.4$$

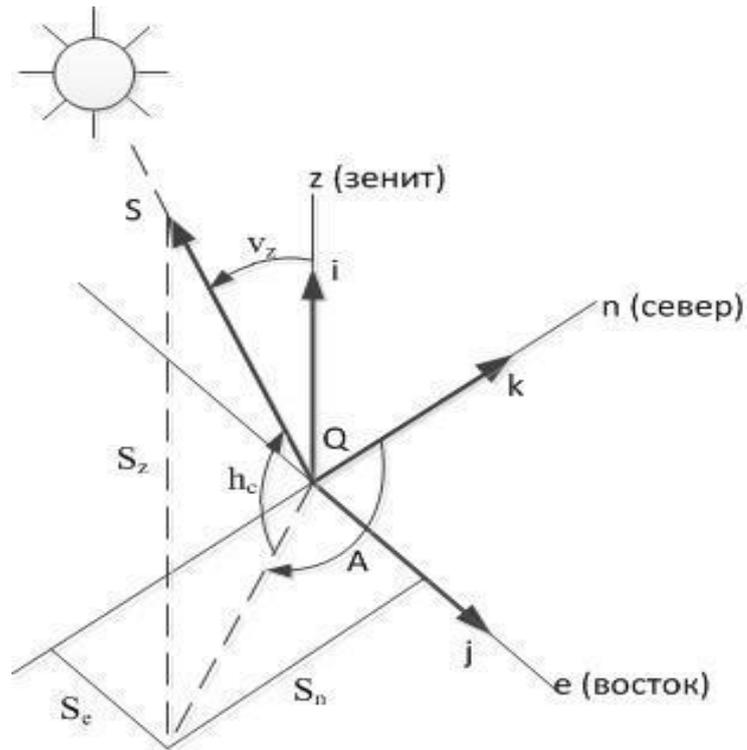


Рисунок 2.5. Солнечный угол для наблюдателя

В векторных обозначениях  $S$  можно записать в виде:

$$S = S_z i + S_e j + S_n k \quad (2.5)$$

где  $i$ ,  $j$  и  $k$  – единичные векторы вдоль осей Зенит ( $z$ ), Восток ( $e$ ) и Северной ( $n$ ). С точки зрения солнечного азимута и высоты,  $S$  можно записать в виде

$$S_z = \sin(h_c)$$

$$S_e = \cos(h_c) \sin(A) \quad (2.6)$$

$$S_n = \cos(h_c) \cos(A)$$

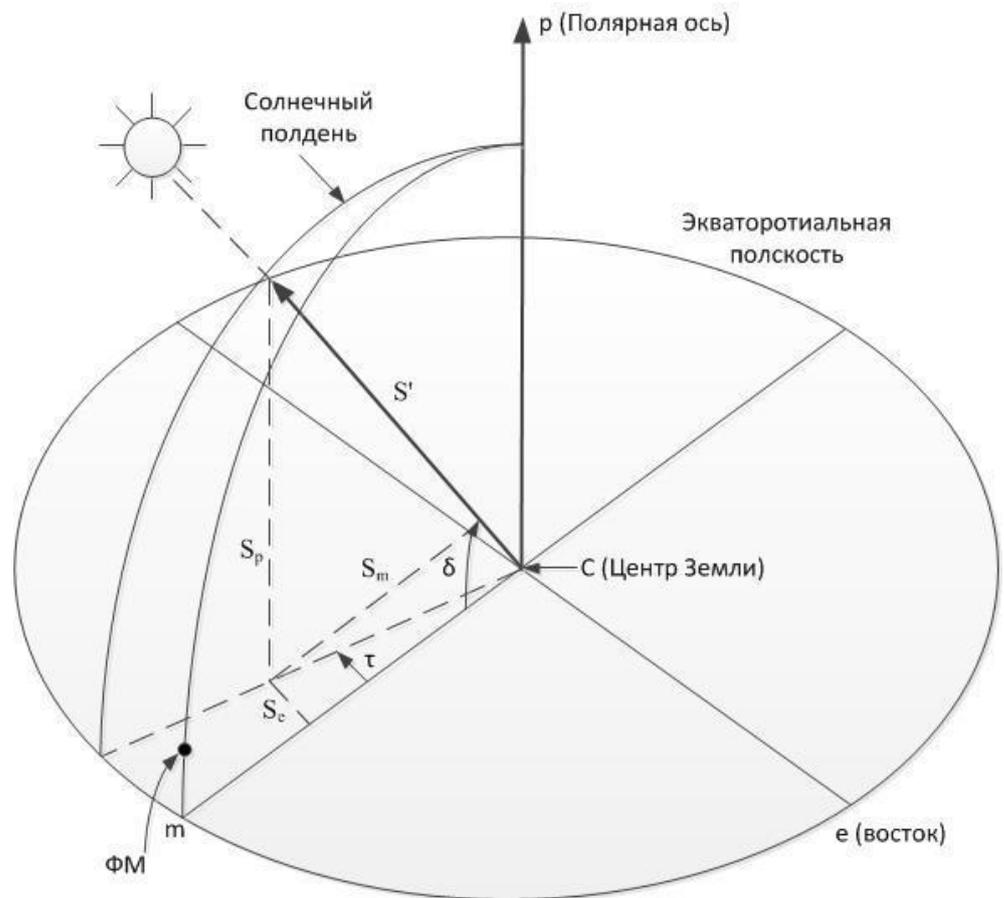


Рисунок 2.6. Геометрия солнечного угла

В геоцентрической системе координат, показанной на рисунке 1.6, ось  $m$  пересекает центр Земли и точку пересечения между местным меридианом и экваториальной плоскостью.

Ось  $e$  перпендикулярна оси  $m$  и лежит в экваториальной плоскости. Ось  $p$  – нормаль экваториальной плоскости, пересекающая Северный полюс. Новый солнечный вектор  $S'$  может быть описан с помощью угла солнечного склонения и часового угла.

$$S' = S_m' i + S_e' j + S_n' k$$

$$S_e = \cos(\delta) \cos(\tau)$$

$$S_e = \cos(\delta) \sin(\tau)$$

$$S_n' = \sin(\delta) \quad (2.7)$$

Топоцентрическая и геоцентрическая координаты связаны между собой вращением вокруг оси  $e$  через угол широты ( $\varphi$ ).

$$\begin{matrix} Sz & \cos(\theta) & 0 & \sin(\theta) & Sm \\ Se = & 0 & 1 & 0 & * Se \\ Sn & -\sin(\theta) & 0 & \cos(\theta) & Sy \end{matrix} \quad 2.8$$

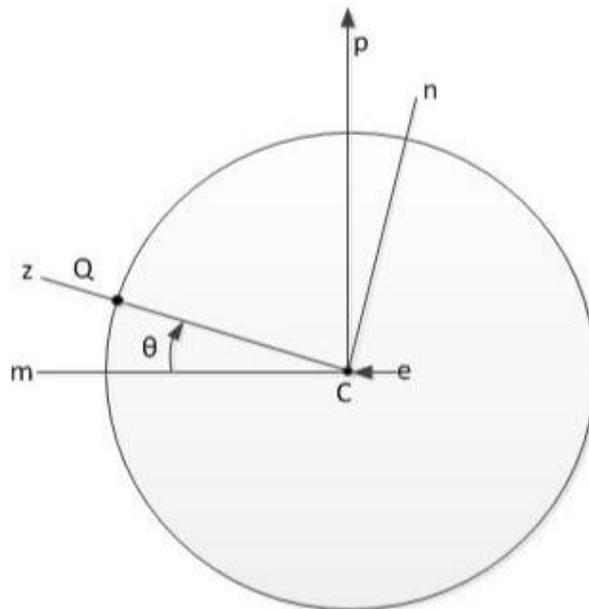


Рисунок 2.7. Преобразование геоцентрических координат в топоцентрические

Решив уравнение 2.8 и подставив в выражения 2.5 и 2.7, получим

$$\begin{cases} \sin(h_c) = \sin(\delta)\sin(\theta) + \cos(\sigma)\cos(\omega)\cos(\theta) \\ \cos(h_c)\sin(A) = -\cos(\sigma)\sin(\tau) \\ \cos(h_c)\cos(A) = \sin(\sigma)\cos(\theta) - \cos(\theta)\cos(\tau)\sin(\theta) \end{cases} \quad (2.9)$$

Из системы уравнений 1.9 выразим  $h_c$

$$h_c = \arcsin(\sin(\delta)\sin(\theta) + \cos(\delta)\cos(\tau)\cos(\theta))$$

Таким образом, высота солнцестояния  $h_c$  зависит от величины склонения Солнца  $\delta$ , часового угла  $\tau$  и широты местности  $\theta$ . Широта местности соответствует географическому местоположению солнечных панелей. Определим оставшиеся две величины.

### 2.2.1 Угол склонения Солнца

Построим график изменения угла склонения Солнца в полдень в течение года, для этого воспользуемся формулой Буржаса [14]:

$$\delta = 0,372 + \sum_{k=1}^3 [Ak * \sin(kD) + Bk * \cos(kD)] \quad (2.11)$$

где коэффициенты  $k$ ,  $A_k$  и  $B_k$  соответствуют значениям, представленным в таблице 2.1, коэффициент  $D$  можно определить по формуле:

$$D = \frac{360}{362.5} * (N - 79.346) \quad (2.12)$$

где N – порядковый номер дня в году.

Таблица 2.1. Значения коэффициентов k, Ak и Bk

k	A	B
1	23,2567	-0,758
2	0,1149	0,3656
3	-0,1712	0,0201

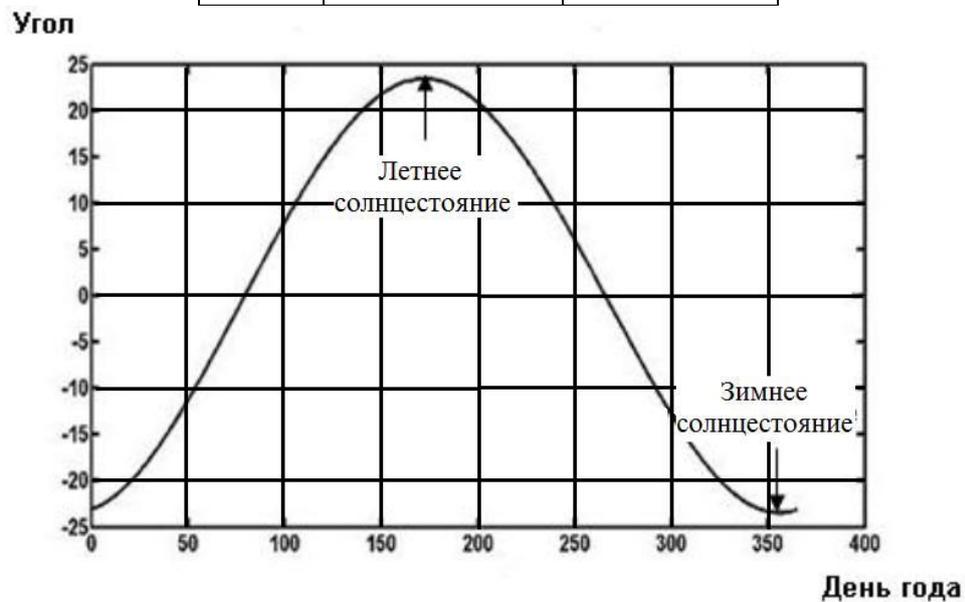


Рис 2.8 – График угла склонения солнца

Как видно из графика выше, угол склонения Солнца изменяется в течение года от  $-23,5^\circ$  до  $23,5^\circ$ . Угол склонения Солнца можно определить, используя более простую формулу:

$$\delta = 23.5 * \sin\left(\left(\frac{365}{360}\right) * (81 - d)\right) \quad (2.13)$$

где  $d$  – порядковый номер дня в году.

### 2.2.2 Часовой угол

Местный часовой угол находится в линейной зависимости от местного солнечного времени

$$\tau = 15(T_s - 12) \quad (2.14)$$

где  $\tau$  - часовой угол, °,

$T_s$  – местное время, ч.

Разность между средним и истинным солнечным временем называется уравнением времени. Разница возникает по двум причинам:

- из-за эллиптической орбиты Земли и неравномерного движения по ней, с максимальной скоростью в перигелии и с минимальной в афелии;

- из-за наклона эклиптики к экватору вблизи равноденствий проекция скорости Солнца на экватор меньше, чем в период солнцестояний, когда оно движется параллельно экватору.

Оба отклонения имеют вид синусоид (рисунок 2.9). Сумма этих двух графиков является графиком уравнения времени.

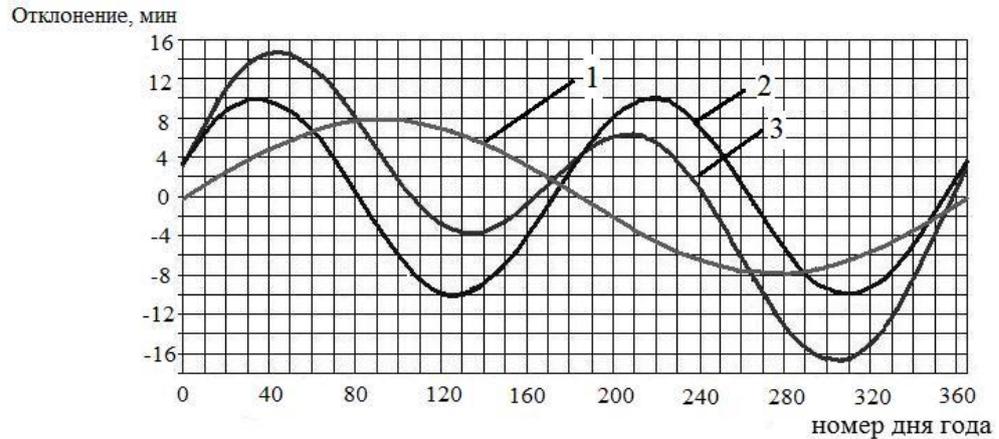


Рисунок 2.9. Графики поправок времени и уравнение времени:

1 – поправка, вызванная эллиптичностью земной орбиты, 2 – поправка, вызванная наклоном эклиптики, 3 - график уравнения времени.

Как видно из рисунка 1.9, истинное солнечное время может смещаться на 17 минут от среднего солнечного времени.

Выражение для определения уравнения времени EOT будет иметь вид:

$$EOT = 60 \sum_{k=1}^6 \left[ Ak * \cos\left(\frac{360kn}{365.25}\right) + Bk * \sin\left(\frac{360kn}{365.25}\right) \right] \quad (2.15)$$

где  $n$  – порядковый номер в цикле високосного года (от 1 до 1461),  $k$ ,  $A$  и  $B$  – константы, значения которых приведены в таблице 2.2

Таблица 2.2. Значения коэффициентов  $k$ ,  $A_k$  и  $B_k$ 

<b>k</b>	<b>A</b>	<b>B</b>
1	$2,0870 \cdot 10^{-4}$	0
2	$9,2869 \cdot 10^{-3}$	$-1,2229 \cdot 10^{-1}$
3	$-5,2258 \cdot 10^{-2}$	$-1,5698 \cdot 10^{-1}$
4	$-1,3077 \cdot 10^{-3}$	$-5,1602 \cdot 10^{-3}$
5	$-2,1867 \cdot 10^{-3}$	$-2,9823 \cdot 10^{-3}$
6	$-1,5100 \cdot 10^{-4}$	$-2,363 \cdot 10^{-4}$

Зависимость истинного значения солнечного времени и местного времени имеет вид:

$$T_s = T_l - \frac{EOT}{60} - P - LC \quad (2.16)$$

где  $T_L$  – местное время,  $P$  – поправка на переход на летнее время ( $P=1$  после перехода на летнее время,  $P=0$  после перехода на зимнее). Таким образом, для Украины с ноября по март – зимнее время, с апреля по октябрь – летнее.

LC можно определить по формуле:

$$LC = (M.д - Д.ст.м)/15 \quad (2.17)$$

где М.д. – местная долгота, Д.ст.м. – долгота стандартного меридиана

Таким образом, определены выражения для всех величин, влияющих на поток прямой солнечной радиации приходящий на поверхность, расположенную под некоторым углом к этому потоку.

Определим формулы для потока прямой солнечной радиации приходящего на поверхность ФМ с применением одно- и двухосной систем контроля.  $\delta$ , часового угла  $\tau$  и широты местности  $\theta$ .

При использовании двухосной системы контроля поверхность солнечных панелей направлена на Солнце, следовательно, угол  $\beta$  между нормалью поверхности и солнечными лучами равен 0, тогда:

$$Sr = Sr_{max} * K_{am} \quad (2.18)$$

Выражение приходящей мощности солнечного излучения для ФМ с одноосной системой контроля будет иметь вид:

$$Sr = Sr_{max} * K_{am} * \cos(\theta - h_c) \quad (2.19)$$

В данном случае учтен угол наклона поверхности к горизонту по второй оси (обычно угол равен широте местоположения солнечных панелей).

Рассчитать приходящую мощность солнечного излучения на неподвижную поверхность, установленную под углом к горизонту, можно по формуле:

$$S_r = S_{r_{\max}} * K_{am} * \cos(\theta - h_c) * \cos(90 - \tau) \quad (2.20)$$

Формулы 1.18-1.20 отображают зависимость приходящей мощности солнечного излучения на поверхность ФМ с применением двухосной и одноосной системы контроля, а также на поверхность стационарно установленного ФМ под углом к горизонту.

Для оценки эффективности систем контроля необходимо сравнить мощности солнечных панелей, выработанная с применением систем контроля, с мощностью стационарно установленных солнечных панелей. Для этого необходимо определить зависимость выходной мощности солнечных панелей от мощности солнечного излучения, приходящего на его поверхность.

### 2.2.3 Мощность солнечных панелей

Наиболее простая модель расчета мощности солнечных панелей - это способ, при котором вырабатываемая мощность считается путем умножения КПД солнечных панелей на солнечное излучение, пришедшее на поверхность солнечных панелей.

$$P_{\text{ФМ}} = S r_{\text{пр}} \cdot \text{КПД} \cdot S_{\text{сп}} \quad (2.21)$$

где  $P_{\text{сп}}$  - выработанная мощность солнечных панелей;

КПД – коэффициент полезного действия ФМ;  $S_{\text{сп}}$  – площадь солнечных панелей.

Совокупность формул 1.1-1.21 составляет математическую модель работы солнечных панелей в течение дня. Описанная модель может быть использована при моделировании работы СЭС с целью предварительной оценки вырабатываемой мощности и расчета необходимого количества СП.

### 2. 3 Подробный расчет

Для начала вычислим истинное солнечное время для Днепра.

Рассмотрим ЕОТ для каждого месяца с января по декабрь, для расчетов возьмем первое число каждого месяца. Мы можем воспользоваться формулой 2.15, однако расчеты ЕОТ не зависят от места применения и для упрощения расчета можно воспользоваться таблицами, которые находятся в свободном доступе.

Таблица 2.3 Значение ЕОТ в зависимости от месяца

м	Янв	Фев	Мар	Апр	Май	Июн	Июл	Авг	Сен	Окт	Ноя	Дек
ЕОТ	+3,4	+13,6	+12,5	+4,1	-2,9	-2,4	+3,6	+6,3	+0,2	-10,1	-16,4	-11,2

Согласно формуле 2.16, Зависимость истинного значения солнечного времени и местного времени имеет вид:

$$T_s = T_l - \frac{EOT}{60} - P - LC$$

где  $T_L$  – местное время,  $P = 0$  для месяцев с ноября по март, и  $P = 1$  с апреля по октябрь (по сколько мы считаем на первое число).

Согласно формуле 2.17

$$LC = (M.д - Д.ст.м)/15$$

где М.д. – местная долгота,

Д.ст.м. – долгота стандартного меридиана.

Для города Днепр местная долгота равняется 35,1 восточной долготы

$$LC = 35,1/15 = 2,33^\circ$$

Когда все величины известны, рассчитаем  $T_s$  для каждого месяца

$$\begin{aligned}
 Ts_1 &:= 12 - \frac{3.4}{60} - 2.33 = 9.613 \\
 Ts_2 &:= 12 - \frac{13.6}{60} - 2.33 = 9.443 \\
 Ts_3 &:= 12 - \frac{12.5}{60} - 2.33 = 9.462 \\
 Ts_4 &:= 12 - \frac{4.1}{60} - 2.33 = 9.602 \\
 Ts_5 &:= 12 - 1 - \frac{3.4}{60} - 2.33 = 8.613 \\
 Ts_6 &:= 12 - 1 + \frac{2.9}{60} - 2.33 = 8.718 \\
 Ts_7 &:= 12 - 1 + \frac{2.4}{60} - 2.33 = 8.71 \\
 Ts_8 &:= 12 - 1 - \frac{3.6}{60} - 2.33 = 8.61 \\
 Ts_9 &:= 12 - 1 - \frac{0.2}{60} - 2.33 = 8.667 \\
 Ts_{10} &:= 12 - 1 + \frac{10.1}{60} - 2.33 = 8.838 \\
 Ts_{11} &:= 12 + \frac{16.4}{60} - 2.33 = 9.943 \\
 Ts_{12} &:= 12 + \frac{11.2}{60} - 2.33 = 9.857
 \end{aligned}$$

Таблица 2.4 Значение истинного солнечного времени в зависимости от  
месяца

м	Янв	Фев	Мар	Апр	Май	Июн	Июл	Авг	Сен	Окт	Ноя	Дек
$T_s, \text{ч}$	9,61	9,44	9,46	9,6	9,62	9,63	9,61	9,57	9,67	9,51	9,4	9,48

Теперь нам необходимо рассчитать местный часовой угол. Согласно формуле 2.14 он находится в линейной зависимости от местного  $T_s$  – местного время, ч.

$$\tau = 15(12 - T_s)^\circ$$

$$\begin{aligned}
 t_1 &:= 15 \cdot (12 - Ts_1) = 35.8 & t_7 &:= 15 \cdot (12 - Ts_7) = 49.35 \\
 t_2 &:= 15 \cdot (12 - Ts_2) = 38.35 & t_8 &:= 15 \cdot (12 - Ts_8) = 50.85 \\
 t_3 &:= 15 \cdot (12 - Ts_3) = 38.075 & t_9 &:= 15 \cdot (12 - Ts_9) = 50 \\
 t_4 &:= 15 \cdot (12 - Ts_4) = 35.975 & t_{10} &:= 15 \cdot (12 - Ts_{10}) = 47.425 \\
 t_5 &:= 15 \cdot (12 - Ts_5) = 50.8 & t_{11} &:= 15 \cdot (12 - Ts_{11}) = 30.85 \\
 t_6 &:= 15 \cdot (12 - Ts_6) = 49.225 & t_{12} &:= 15 \cdot (12 - Ts_{12}) = 32.15
 \end{aligned}$$

Таблица 2.5 Значение местного часового угла в зависимости от месяца

М	Янв	Фев	Мар	Апр	Май	Июн	Июл	Авг	Сен	Окт	Ноя	Дек
$\tau^\circ$	35,8	38,35	38,075	35,975	50,8	49,23	49,35	50,85	50	47,43	30,9	32,15

Определим угол склонения солнца. Его можно определить, используя формулу 2.13:

$$\delta = 23,5 \cdot \sin\left(\frac{365}{360} \cdot (81 - d)\right)$$

где  $d$  – порядковый номер дня в году.

Порядковые номера первых чисел каждого месяца

$$d = 1, 32, 60, 91, 121, 152, 182, 213, 244, 274, 305, 335$$

$\sigma_1 := 23.5 \cdot \sin\left(\frac{365}{360} \cdot (d_1 - 81) \text{ deg}\right) = -23.218$	$\sigma_7 := 23.5 \cdot \sin\left(\frac{365}{360} \cdot (d_7 - 81) \text{ deg}\right) = 22.952$
$\sigma_2 := 23.5 \cdot \sin\left(\frac{365}{360} \cdot (d_2 - 81) \text{ deg}\right) = -17.918$	$\sigma_8 := 23.5 \cdot \sin\left(\frac{365}{360} \cdot (d_8 - 81) \text{ deg}\right) = 16.952$
$\sigma_3 := 23.5 \cdot \sin\left(\frac{365}{360} \cdot (d_3 - 81) \text{ deg}\right) = -8.533$	$\sigma_9 := 23.5 \cdot \sin\left(\frac{365}{360} \cdot (d_9 - 81) \text{ deg}\right) = 5.978$
$\sigma_4 := 23.5 \cdot \sin\left(\frac{365}{360} \cdot (d_4 - 81) \text{ deg}\right) = 4.137$	$\sigma_{10} := 23.5 \cdot \sin\left(\frac{365}{360} \cdot (d_{10} - 81) \text{ deg}\right) = -6.351$
$\sigma_5 := 23.5 \cdot \sin\left(\frac{365}{360} \cdot (d_5 - 81) \text{ deg}\right) = 15.279$	$\sigma_{11} := 23.5 \cdot \sin\left(\frac{365}{360} \cdot (d_{11} - 81) \text{ deg}\right) = -17.218$
$\sigma_6 := 23.5 \cdot \sin\left(\frac{365}{360} \cdot (d_6 - 81) \text{ deg}\right) = 22.348$	$\sigma_{12} := 23.5 \cdot \sin\left(\frac{365}{360} \cdot (d_{12} - 81) \text{ deg}\right) = -22.945$

Таблица 2.6 Значение угла склонения солнца в зависимости от месяца

м	Янв	Фев	Мар	Апр	Май	Июн	Июл	Авг	Сен	Окт	Ноя	Дек
$\delta^\circ$	-23,22	-17,9	-8,53	4,14	15,18	22,35	22,95	16,95	5,98	-6,35	-17,21	-22,94

Согласно формуле 2.10, высота солнцестояния  $h_c$  зависит от величины склонения Солнца  $\delta$ , часового угла  $\tau$  и широты местности  $\theta$ . Широта местности соответствует географическому местоположению ФМ.

$$h_c = \arcsin(\sin(\delta) * \sin(\theta) + \cos(\delta)\cos(\tau)\cos(\theta))$$

$$x_5 := \sin(\sigma_5 \text{ deg}) \cdot \sin(48 \text{ deg}) + \cos(\sigma_5 \text{ deg}) \cdot \cos(t_5 \text{ deg}) \cdot \cos(48 \text{ deg}) = 0.604$$

$$hc_5 := x_5 \cdot \frac{180}{\pi} = 34.595$$

$$x_6 := \sin(\sigma_6 \text{ deg}) \cdot \sin(48 \text{ deg}) + \cos(\sigma_6 \text{ deg}) \cdot \cos(t_6 \text{ deg}) \cdot \cos(48 \text{ deg}) = 0.687$$

$$hc_6 := x_6 \cdot \frac{180}{\pi} = 39.348$$

$$x_7 := \sin(\sigma_7 \text{ deg}) \cdot \sin(48 \text{ deg}) + \cos(\sigma_7 \text{ deg}) \cdot \cos(t_7 \text{ deg}) \cdot \cos(48 \text{ deg}) = 0.691$$

$$hc_7 := x_7 \cdot \frac{180}{\pi} = 39.602$$

$$x_8 := \sin(\sigma_8 \text{ deg}) \cdot \sin(48 \text{ deg}) + \cos(\sigma_8 \text{ deg}) \cdot \cos(t_8 \text{ deg}) \cdot \cos(48 \text{ deg}) = 0.621$$

$$hc_8 := x_8 \cdot \frac{180}{\pi} = 35.568$$

$$x_9 := \sin(\sigma_9 \text{ deg}) \cdot \sin(48 \text{ deg}) + \cos(\sigma_9 \text{ deg}) \cdot \cos(t_9 \text{ deg}) \cdot \cos(48 \text{ deg}) = 0.505$$

$$hc_9 := x_9 \cdot \frac{180}{\pi} = 28.944$$

$$x_1 = \sin(\sigma_1 \text{ deg}) \cdot \sin(48 \text{ deg}) + \cos(\sigma_1 \text{ deg}) \cdot \cos(t_1 \text{ deg}) \cdot \cos(48 \text{ deg}) = 0.206$$

$$hc_1 = x_1 \cdot \frac{180}{\pi} = 11.791$$

$$x_2 = \sin(\sigma_2 \text{ deg}) \cdot \sin(48 \text{ deg}) + \cos(\sigma_2 \text{ deg}) \cdot \cos(t_2 \text{ deg}) \cdot \cos(48 \text{ deg}) = 0.271$$

$$hc_2 = x_2 \cdot \frac{180}{\pi} = 15.509$$

$$x_3 = \sin(\sigma_3 \text{ deg}) \cdot \sin(48 \text{ deg}) + \cos(\sigma_3 \text{ deg}) \cdot \cos(t_3 \text{ deg}) \cdot \cos(48 \text{ deg}) = 0.411$$

$$hc_3 = x_3 \cdot \frac{180}{\pi} = 23.528$$

$$x_4 = \sin(\sigma_4 \text{ deg}) \cdot \sin(48 \text{ deg}) + \cos(\sigma_4 \text{ deg}) \cdot \cos(t_4 \text{ deg}) \cdot \cos(48 \text{ deg}) = 0.594$$

$$hc_4 = x_4 \cdot \frac{180}{\pi} = 34.017$$

$$hc_8 = x_8 \cdot \frac{180}{\pi} = 35.568$$

$$x_9 = \sin(\sigma_9 \text{ deg}) \cdot \sin(48 \text{ deg}) + \cos(\sigma_9 \text{ deg}) \cdot \cos(t_9 \text{ deg}) \cdot \cos(48 \text{ deg}) = 0.505$$

$$hc_9 = x_9 \cdot \frac{180}{\pi} = 28.944$$

$$x_{10} = \sin(\sigma_{10} \text{ deg}) \cdot \sin(48 \text{ deg}) + \cos(\sigma_{10} \text{ deg}) \cdot \cos(t_{10} \text{ deg}) \cdot \cos(48 \text{ deg}) = 0.368$$

$$hc_{10} = x_{10} \cdot \frac{180}{\pi} = 21.068$$

$$x_{11} = \sin(\sigma_{11} \text{ deg}) \cdot \sin(48 \text{ deg}) + \cos(\sigma_{11} \text{ deg}) \cdot \cos(t_{11} \text{ deg}) \cdot \cos(48 \text{ deg}) = 0.329$$

$$hc_{11} = x_{11} \cdot \frac{180}{\pi} = 18.835$$

$$x_{12} = \sin(\sigma_{12} \text{ deg}) \cdot \sin(48 \text{ deg}) + \cos(\sigma_{12} \text{ deg}) \cdot \cos(t_{12} \text{ deg}) \cdot \cos(48 \text{ deg}) = 0.232$$

$$hc_{12} = x_{12} \cdot \frac{180}{\pi} = 13.292$$

+

м	Янв	Фев	Мар	Апр	Май	Июн	Июл	Авг	Сен	Окт	Ноя	Дек
$h_c$	11,79	15,51	23,53	34,02	34,6	39,35	39,6	35,57	28,94	21,06	18,84	13,29

Таблица 2.7 Значение высоты солнцестояния в зависимости от месяца

Теперь рассчитаем  $K_{at}$  – коэффициент поправки на воздушную массу, которую необходимо пройти лучу. Согласно формуле 1.2

$$K_{am} = 1,1254 - (0,1366/\sin(hc))$$

$K_{am_1} := 1.1254 - \left( \frac{0.1366}{x_1} \right) = 0.462$	$K_{am_7} := 1.1254 - \left( \frac{0.1366}{x_7} \right) = 0.928$
$K_{am_2} := 1.1254 - \left( \frac{0.1366}{x_2} \right) = 0.621$	$K_{am_8} := 1.1254 - \left( \frac{0.1366}{x_8} \right) = 0.905$
$K_{am_3} := 1.1254 - \left( \frac{0.1366}{x_3} \right) = 0.793$	$K_{am_9} := 1.1254 - \left( \frac{0.1366}{x_9} \right) = 0.855$
$K_{am_4} := 1.1254 - \left( \frac{0.1366}{x_4} \right) = 0.895$	$K_{am_{10}} := 1.1254 - \left( \frac{0.1366}{x_{10}} \right) = 0.754$
$K_{am_5} := 1.1254 - \left( \frac{0.1366}{x_5} \right) = 0.899$	$K_{am_{11}} := 1.1254 - \left( \frac{0.1366}{x_{11}} \right) = 0.71$
$K_{am_6} := 1.1254 - \left( \frac{0.1366}{x_6} \right) = 0.926$	$K_{am_{12}} := 1.1254 - \left( \frac{0.1366}{x_{12}} \right) = 0.537$

Таблица 2.8 Значение коэффициента поправки на воздушную массу в зависимости от месяца

м	Янв	Фев	Мар	Апр	Май	Июн	Июл	Авг	Сен	Окт	Ноя	Дек
$K_{am}$	0,46	0,62	0,79	0,895	0,899	0,93	0,93	0,91	0,86	0,75	0,71	0,54

При использовании двухосной системы контроля поверхность солнечной панели направлена на Солнце, следовательно, угол  $\beta$  между нормалью поверхности и солнечными лучами равен 0, тогда, согласно формуле 2.18:

$$Sr = Sr_{max} * K_{am}$$

$Srd_1 := Sr_{max} \cdot Kam_1 = 426.989$	$Srd_7 := Sr_{max} \cdot Kam_7 = 858.184$
$Srd_2 := Sr_{max} \cdot Kam_2 = 574.186$	$Srd_8 := Sr_{max} \cdot Kam_8 = 837.453$
$Srd_3 := Sr_{max} \cdot Kam_3 = 733.293$	$Srd_9 := Sr_{max} \cdot Kam_9 = 790.867$
$Srd_4 := Sr_{max} \cdot Kam_4 = 828.172$	$Srd_{10} := Sr_{max} \cdot Kam_{10} = 697.371$
$Srd_5 := Sr_{max} \cdot Kam_5 = 831.728$	$Srd_{11} := Sr_{max} \cdot Kam_{11} = 656.632$
$Srd_6 := Sr_{max} \cdot Kam_6 = 857.005$	$Srd_{12} := Sr_{max} \cdot Kam_{12} = 496.318$

Таблица 2.9 Значение мощности при использовании двухосной системы ориентирования в зависимости от месяца

М	Янв	Фев	Мар	Апр	Май	Июн	Июл	Авг	Сен	Окт	Ноя	Дек
$Sr_D$	426	574	733	828	831	857	858	837	790	697	657	496

Согласно формуле 2.19 для одноосной системы ориентирования:

$$Sr = Sr_{max} * K_{am} * \cos(\theta - h_c)$$

$SrO_1 := Srd_1 \cdot (\cos((48 - hc_1) \text{ deg})) = 344.522$	$SrO_7 := Srd_7 \cdot (\cos((48 - hc_7) \text{ deg})) = 848.982$
$SrO_2 := Srd_2 \cdot (\cos((48 - hc_2) \text{ deg})) = 484.311$	$SrO_8 := Srd_8 \cdot (\cos((48 - hc_8) \text{ deg})) = 817.816$
$SrO_3 := Srd_3 \cdot (\cos((48 - hc_3) \text{ deg})) = 667.417$	$SrO_9 := Srd_9 \cdot (\cos((48 - hc_9) \text{ deg})) = 747.526$
$SrO_4 := Srd_4 \cdot (\cos((48 - hc_4) \text{ deg})) = 803.631$	$SrO_{10} := Srd_{10} \cdot (\cos((48 - hc_{10}) \text{ deg})) = 621.74$
$SrO_5 := Srd_5 \cdot (\cos((48 - hc_5) \text{ deg})) = 809.069$	$SrO_{11} := Srd_{11} \cdot (\cos((48 - hc_{11}) \text{ deg})) = 573.386$
$SrO_6 := Srd_6 \cdot (\cos((48 - hc_6) \text{ deg})) = 847.251$	$SrO_{12} := Srd_{12} \cdot (\cos((48 - hc_{12}) \text{ deg})) = 408.003$

Таблица 2.10 Значение мощности при использовании одноосной системы ориентирования в зависимости от месяца

М	Янв	Фев	Мар	Апр	Май	Июн	Июл	Авг	Сен	Окт	Ноя	Дек
$Sr_O$	344	484	667	804	809	847	849	818	748	622	573	408

Для постоянно установленной панели, согласно формуле 2.20:

$$Sr = Sr_{max} * K_{am} * \cos(\theta - h_c) * \cos(90 - \tau)$$

$SrB_1 := SrO_1 \cdot \cos((90 - t_1) \text{ deg}) = 201.531$	$SrB_7 := SrO_7 \cdot \cos((90 - t_7) \text{ deg}) = 644.125$
$SrB_2 := SrO_2 \cdot \cos((90 - t_2) \text{ deg}) = 300.497$	$SrB_8 := SrO_8 \cdot \cos((90 - t_8) \text{ deg}) = 634.213$
$SrB_3 := SrO_3 \cdot \cos((90 - t_3) \text{ deg}) = 411.591$	$SrB_9 := SrO_9 \cdot \cos((90 - t_9) \text{ deg}) = 572.638$
$SrB_4 := SrO_4 \cdot \cos((90 - t_4) \text{ deg}) = 472.078$	$SrB_{10} := SrO_{10} \cdot \cos((90 - t_{10}) \text{ deg}) = 457.845$
$SrB_5 := SrO_5 \cdot \cos((90 - t_5) \text{ deg}) = 626.983$	$SrB_{11} := SrO_{11} \cdot \cos((90 - t_{11}) \text{ deg}) = 294.028$
$SrB_6 := SrO_6 \cdot \cos((90 - t_6) \text{ deg}) = 641.607$	$SrB_{12} := SrO_{12} \cdot \cos((90 - t_{12}) \text{ deg}) = 217.114$

Таблица 2.11 Значение мощности без системы ориентирования в зависимости от месяца

М	Янв	Фев	Мар	Апр	Май	Июн	Июл	Авг	Сен	Окт	Ноя	Дек
$Sr_{\bar{o}}$	202	300	411	472	626	641	644	634	573	458	294	217

Рассмотрим средний месячный уровень солнечной радиации (солнечная постоянная) в Днепре ( $\text{кВтч}/\text{м}^2/\text{день}$ ). Это средний показатель за последние 22 года (По данным NASA) [39]

Таблица 2.12 Значение солнечной инсоляции в зависимости от месяца

Месяц	1	2	3	4	5	5	7	8	9	10	11	12	Всего
Днепр	1,21	1,99	2,98	4,05	5,55	5,57	5,70	5,08	3,66	2,27	1,20	0,96	3,36

Сравнить расчетные показатели с показателями NASA напрямую невозможно, так как расчетные данные для конкретного времени в конкретный день, в то время как информация NASA в среднем за месяц, но мы можем увидеть четкое соответствие и там, и там, уровень радиации постоянно растет, достигает максимального в июле и дальше падает до конца года.

Для сравнения эффективности всех видов систем ориентирования создадим визуализацию расчетов.

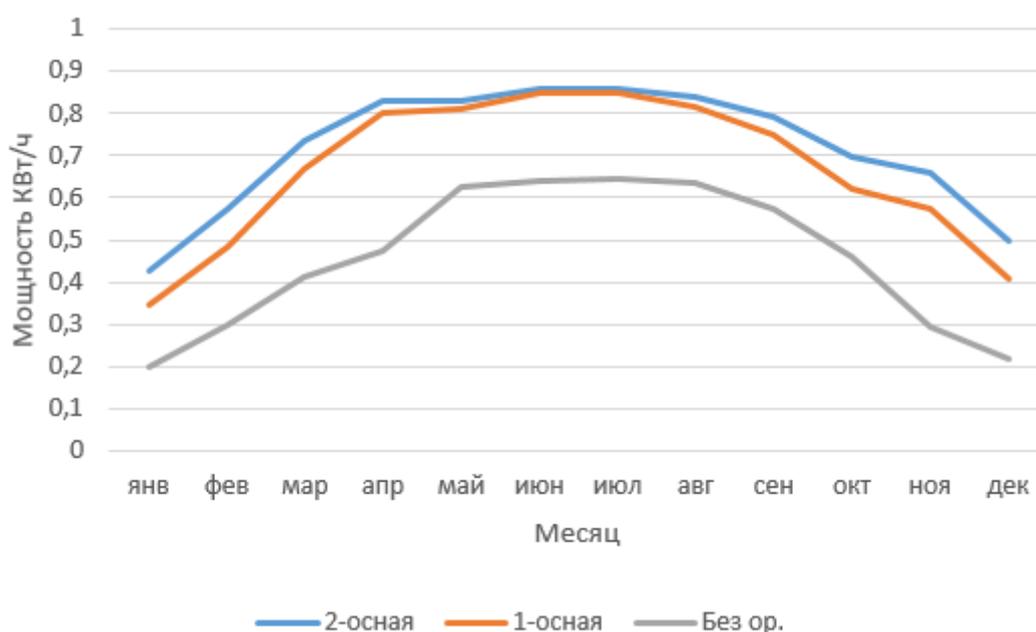


Рис. 2.10 График максимальной мощности на  $1\text{ м}^2$  в зависимости от даты

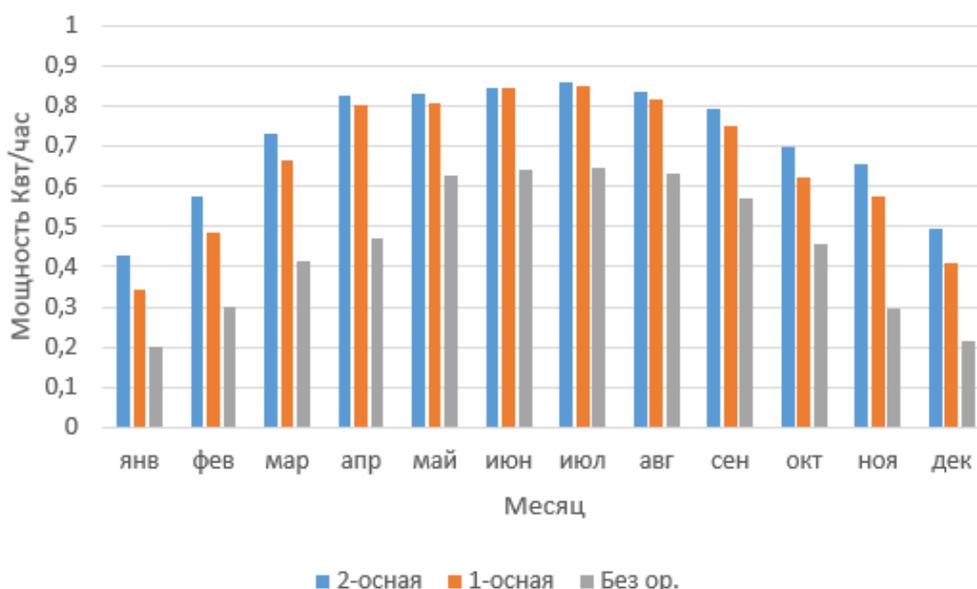


Рис. 2.11 Гистограмма максимальной мощности на  $1\text{м}^2$  в зависимости от даты.

По графикам мы можем увидеть, что системы ориентирования максимально себя реализуют в холодное время года. Разницы между одноосной и двухосной системами в летнее время практически нет, однако с октября по март двухосная система ориентирования дает выигрыш до 30 процентов по сравнению с одноосной.

Суммарно за год одноосная система ориентирования дает прирост примерно 51 процент по сравнению с панелями без ориентирования, двухосная – 63 процента.

В экономической части будет исследовано что система ориентирования в общей сумме занимает примерно четверть стоимости по сравнению с панелями без системы ориентирования ( $\approx 8000$  грн /  $32800$  грн), затраты на ее обслуживания минимальны. При приросте производительности в 53 процента ее использование однозначно обосновано. за год одноосная система ориентирования дает прирост

примерно 51 процент по сравнению с панелями без ориентирования, двухосная – 63 процента.

#### **2.4 Выводы по разделу**

Для города Днепр проведен расчет эффективности различных систем ориентирования солнечных панелей. Для этого была рассчитана максимальная мощность, которую может получить панель площадью 1м, для расчета были вычислены высота солнцестояния, солнечный угол, часовой угол, истинное солнечное время и другие величины для данной местности. За год одноосная система ориентирования дает прирост примерно 51 процент по сравнению с панелями без ориентирования, двухосная – 63 процента.

## **РАЗДЕЛ 3. ОБОСНОВАНИЕ КОНСТРУКЦИИ ДВУХОСНОЙ СИСТЕМЫ ОРИЕНТИРОВАНИЯ СОЛНЕЧНЫХ ПАНЕЛЕЙ**

### **3.1 Выбор разрабатываемого объекта**

По результатам расчетов, проведенных в разделе 2 можно сделать вывод что наиболее эффективной является 2-осная система ориентирования, однако ее использование имеет смысл только при невысоких затратах на установку и обслуживание по сравнению с одноосной. Существует много готовых вариантов исполнения, но в основном они отличаются высокой стоимостью в следствии негибкости в выбираемых компонентах.

Задачей раздела является предложить конструкцию при которой была бы возможна ориентация установки по двум осям, а также предложить и обосновать выбор всех ее компонентов.

### **3.2 Конструктивное исполнение установки**

Предлагаемая конструкция состоит из неподвижного основания; подвижного основания, приводимого в движение электромеханической системой азимутального вращения; двух стоек; рамы с закреплёнными на ней четырьмя СБ приводимой в движение электромеханической системой слежения по углу места.

На рисунке приведен эскиз установки [14].

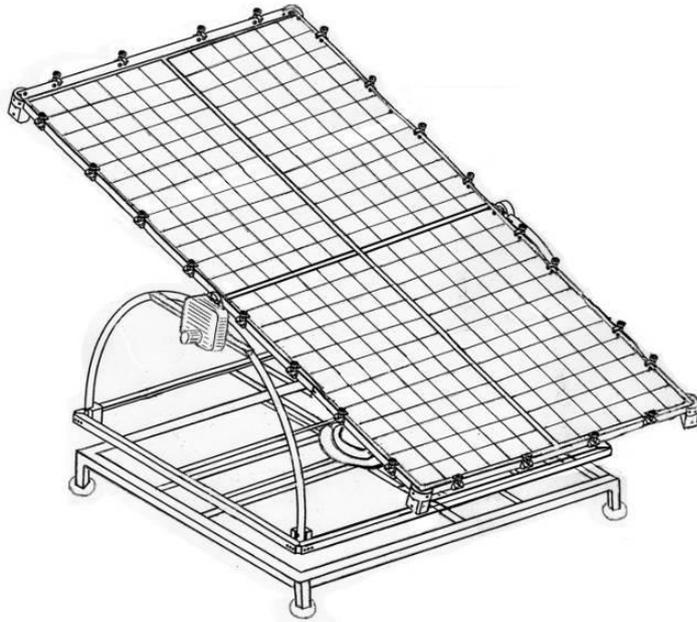


Рисунок 3.1 – конструкция системы

Основные детали конструкции: рама с СБ типа КСМ-190 [15]; подвижный каркас; неподвижный каркас; блоки двух редукторов включая червячный редуктор; два шаговых двигателя (далее ШД); датчик положения Солнца; пять конечных выключателей.

В качестве элементов поглощения солнечной энергии примем 4 солнечные батареи КСМ-190, как наиболее экономически обоснованные. Площадь одной солнечной панели  $1,26 \text{ м}^2$ .

Величина массы рамы с четырьмя СБ типа КСМ-190 составляет 102 кг, ширина – 3,2 м, высота – 1,6 м.



Рис 3.2 Солнечная панель КСМ-190

Таблица 3.1 Характеристики солнечной панели КСМ – 190

<b>Солнечная батарея</b>	<b>КСМ-190</b>
<b>Мощность <math>P_{max}</math> , Вт</b>	190
<b>Напряжение в точке Max Power, В</b>	35,7
<b>Ток в точке Max Power, А</b>	5,4
<b>Напряжение холостого хода, В</b>	44,7

<b>Солнечная батарея</b>	<b>КСМ-190</b>
<b>Ток короткого замыкания, А</b>	5,8
<b>Коммутационное напряжение, В</b>	24
<b>Габаритные размеры, мм</b>	1586 x 806 x 35
<b>Масса, кг</b>	16

В качестве силовых механизмов, обеспечивающих поворот фотоэлектрической установки, используем редукторы с общими передаточными отношениями 1:250 (по азимуту) и 1:900 (по углу места). На рисунке 3.2 показаны редукторы, соединенные с ШД, для механизмов перемещения по азимуту и углу места.



Рисунок 3.3 – Двигатели ШД-5Д с редукторами

В таблице 3.2 представлены паспортные характеристики двигателя ШД-5Д

Таблица 3.2 – Паспортные характеристики шагового двигателя

Характеристики	Показатели
Напряжение питания, В	24, 48
Максимальный ток фазы, А	3
Статическая погрешность отработки шага, мин	27
Номинальный момент, Н*м	0,1
Максимальная частота отработки шагов в номинальном режиме, Гц	16000
Режим работы	Длительный
Единичный шаг ШД, градус	1,5
Единичный шаг при использовании драйвера типа DQ-356M, градус	0,03
Номинальный момент инерции нагрузки, кг*м <sup>2</sup>	$4 \cdot 10^{-6}$
Номинальная приемистость, шаг/с	2000
Момент инерции ротора, кг*м <sup>2</sup>	$7 \cdot 10^{-6}$
Сопротивление фазной обмотки постоянному току, Ом	10,1
Индуктивность фазной обмотки, мГн	16+-4
Максимальное допустимое значение тока в фазовых обмотках при импульсной форсировке, А	7
Предельное повышение температуры обмоток, *С	+ 170
Предельное повышение температуры корпуса, С	+ 130

Момент инерции нагрузки, кг*м <sup>2</sup>	$4 \cdot 10^{-6}$
Максимальный развиваемый момент при частоте задающих импульсов 2000 Гц и инерции нагрузки $J_n = 2 \cdot 10^{-6}$ , кг*м <sup>2</sup>	0,5 Н*м
Максимальный развиваемый момент при частоте задающих импульсов 2000 Гц и инерции нагрузки $J_n = 8 \cdot 10^{-6}$ , кг*м <sup>2</sup>	0,4 Н*м

В установке применяются шестифазные двигатели ШД-5Д. Шесть обмоток двигателя соединяются в трехфазное включение (в звезду или в треугольник). В этом случае можно использовать несколько типов драйверов: KND BD3H [16], DQ-356M [17], DM-356M.



Рисунок 3.4 – Драйвер типа KND BD3H

### 3.3 Расчет моментов инерции конструкции

Для исследования динамических характеристик электромеханической системы слежения необходимо знать величину приведенного к валу двигателя момента инерции рамы с СБ. В разработанной конструкции изменяется момент инерции механизма, а именно изменение положения

рамы с СБ по углу места приводит к изменению момента инерции по азимуту. Поэтому требуется провести расчет момента инерции механизма, в котором установлены четыре СБ типа КСМ-190. Момент инерции механизма определяется по следующей формуле [18]:

$$\begin{cases} J_h = \frac{1}{12} m(w^2 + d^2) \\ J_d = \frac{1}{12} m(h^2 + w^2) \\ J_w = \frac{1}{12} m(h^2 + d^2) \end{cases} \quad 3.1$$

где  $m$  – масса рамы с СБ;  $h$  – высота рамы с СБ;  $d$  – ширина рамы с СБ,  $w$  – глубина рамы с СБ.

Приведенный к валу двигателя момент инерции уменьшается на величину в квадратной зависимости от передаточного числа редуктора  $i$  ( $i = 900$  согласно паспортным данным)

$$J_i = J_1 / i^2 \quad 3.2$$

Подсчитаем момент инерции для азимутального исполнительного механизма слежения при двух крайних положениях рамы с СБ по углу места: первый вариант – рама с СБ находится в вертикальном положении (угол места равен 0 градусов); второй вариант – рама с СБ находится в горизонтальном положении (угол места равен 90 градусов). Упрощенно механическая часть установки, когда рама с СБ находится в вертикальном положении, показана на рисунке 3.2,а, а когда рама с СБ находится в горизонтальном положении – на рисунке 3.2,б.

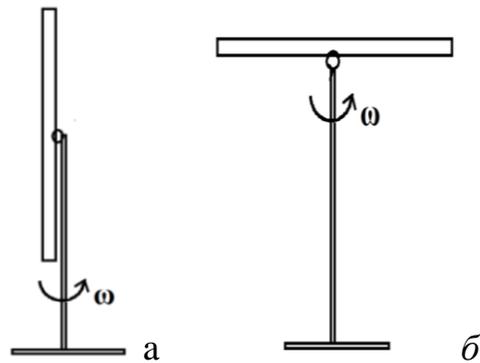


Рисунок 3.4 – Расположение конструкции рамы с СБ при угле места, равном 0 и 90 градусов

В первом варианте момент инерции [19] можно рассчитать, как для пластины с шириной  $d$  глубиной  $w$  и массой  $m$  по следующей формуле:

$$J_1 = \frac{1}{12} m(d^2 + w^2) \quad 3.3$$

$$J_1 = 87,04 \text{ кг*м}^2$$

$$J_{i1} = J_1 / i^2 = 107,4 * 10^{-6} \text{ кг*м}^2$$

Во втором варианте момент инерции можно рассчитать, как для твёрдого кубоида с высотой  $h$ , шириной  $d$ , глубиной  $w$  и массой  $m$  по формуле (3.1).

$$J_1 = \frac{1}{12} m(h^2 + d^2) \quad 3.3$$

$$J_1 = 108,9 \text{ кг*м}^2,$$

$$J_{i2} = J_1 / i^2 = 134 * 10^{-6} \text{ кг*м}^2,$$

Расчет моментов инерции может быть использован для последующих расчетов переходных процессов.

Для исследования динамических характеристик электромеханической системы слежения необходимо провести расчет величины дополнительного момента от ветровой нагрузки, действующей на раму с СБ. Момент от ветровой нагрузки может быть рассчитан по следующей формуле [20]:

$$M_{\text{ветр}} = \frac{1}{4} SLW \quad 3.4$$

где  $W = 0,61V^2$ ;  $S$  – площадь СБ;  $L$  – высота рамы (установки);  $V$  – скорость ветра.

Таблица 3.3 – Величина момента для шагового двигателя от скорости ветра

Скорость ветра, м/с	1	5	10	15	20	25	30
Момент ветровой нагрузки, Н*м	0,6	15	60	130	240	375	540
Приведенный момент к валу двигателя по углу места, Н*м	0,00066	0,0166	0,066	0,148	0,26	0,4	0,6
Приведенный момент к валу двигателя по азимуту, Н*м	0,0024	0,06	0,24	0,54	0,96	1,5	2,16

При использовании двигателя ШД-5Д в установке при скорости ветра 15 м/с момент от действия ветровой нагрузки в системе перемещения по азимуту превышает максимальный момент двигателя ШД-5Д в 1,4 раза, при скорости ветра 20 м/с – в 2,4 раза, а в системе перемещения по углу места при скорости 25 м/с момент от действия ветровой нагрузки превышает максимальный момент шагового двигателя. В рекомендациях по применению ШД [19] для исключения сбоя в ШД момент нагрузки не должен быть выше 0,3–0,5 от максимального момента. Соответственно при скоростях ветра выше 15 м/с лучше переводить установку в горизонтальное положение.

### **3.4 Повышение живучести и надежности функционирования АСУ слежения при действии ветровой нагрузки**

Для повышения живучести и надежности работы АСУ слежения при действии ураганной ветровой нагрузки (например, скорость ветра более 25 м/с), которая может привести к повреждению механизма перемещения, предлагается переводить раму с СБ в защитное горизонтальное положение. Это необходимо делать по сигналу от МЧС (или другого информационно-технического источника распространения оперативной информации о штормовом предупреждении) или от оператора компании, обслуживающей установку, через канал GPRS. В АСУ слежения осуществляется прием команд от модуля GPRS через контроллер слежения. В установке установлен конечный выключатель, определяющий горизонтальное положение рамы по углу места. При получении сигнала об ураганной ветровой нагрузке АСУ слежения переводит раму с СБ в горизонтальное положение. При этом идет сообщение оператору, что система переведена в защитное положение.

### 3.5 Выбор гелиотрекера

Для максимального использования энергии солнца, панель постоянно должна находиться перпендикулярно его лучам. Гелиотрекер дословно можно перевести как «отслеживатель пути Солнца». Задача его быть постоянно направленным на Солнце. Простой и достаточно недорогой вариант [20] показан на рисунке 1.27. Выберем для установки гелиотрекер AEDR-8300-1K2. Он состоит из фотоприемника, контроллера и исполнительного механизма в виде двух двигателей с редукторами, поворачивающих СБ и укрепленный на нем фотоприемник. Фотоприемник представляет собой небольшую плату с укрепленными на ней 4 фотодатчиками. Все фотодатчики разделены между собой крестообразной перегородкой. При ориентации на Солнце освещены все четыре фотодатчика. Солнце в процессе своего движения по небосводу изменяет освещенность фотоприемника, поэтому 2 или 3 фотодатчика оказываются в тени. В алгоритме работы датчика всего 9 команд в зависимости от положений фотоприемника. На рисунке 1.27 каждый фотодатчик обозначен буквой. Все возможные варианты освещения датчиков представлены в таблицах 1.3 и 1.4.

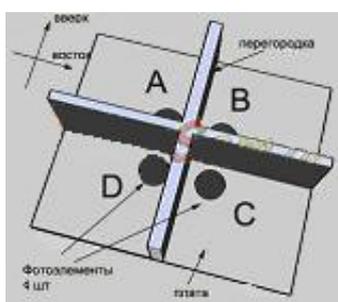


Рисунок 3.4 – Гелиотрекер

Таблица 3.4 – Возможные варианты освещения датчиков для двухкоординатной системы слежения

Датчик А	1	0	1	1	0
Датчик В	0	1	1	0	0
Датчик С	0	0	0	0	1
Датчик D	0	0	0	1	0
Примечание	Солнце выше и западнее	Солнце выше и восточнее	Солнце выше	Солнце западнее	Солнце ниже и восточнее
Верт-е движ-е	Вверх	Вверх	Вверх	Стоять	Вниз
Гор-е движ-е	На запад	На восток	Стоять	На запад	На восток

Таблица 3.5 – Возможные варианты освещения датчиков для двухкоординатной системы слежения

Датчик А	0	0	0	1
Датчик В	1	0	0	1
Датчик С	1	1	0	1
Датчик D	0	1	1	1

Примечание	Солнце восточнее	Солнце ниже	Солнце ниже и западнее	Точно на Солнце
Верт-е движ-е	Стоять	Вниз	Вниз	Стоять
Гори-е движ-е	На восток	Стоять	На запад	Стоять

В таблицах 1.3 и 1.4 приняты следующие обозначения: 1 – датчик освещен; 0 – датчик в тени перегородки.

### 3.6 Разработка алгоритма слежения за солнцем

Следующая задача – обеспечение слежения конструкции СБ за Солнцем с заданной точностью. Решается следующим путем:

- разработкой нелинейного алгоритма слежения за Солнцем,;
- обеспечением повышения статической точности перемещения при использовании ШД
- использованием специализированного контроллера слежения за Солнцем (32-разрядного микроконтроллера со встроенным 16-разрядным АЦП), специального двухкоординатного датчика положения Солнца (обладающего заданной чувствительностью в широком диапазоне изменения освещенности), двухкоординатного электромеханического исполнительного механизма с ШД (обеспечивающего нелинейный режим позиционирования).

Для отслеживания положения солнца наиболее рационально использовать Непрерывно-дискретное слежение за Солнцем. Непрерывно-дискретное слежение за Солнцем подразумевает перемещение на необходимый (заданный) угол с последующей остановкой ШД. Его необходимо реализовывать, исходя из следующих положений:

- чем выше точность слежения СБ за Солнцем, тем больше СБ вырабатывает электрической энергии и в системе. Повышение точности слежения происходит путем уменьшения шага перемещения в электромеханическом исполнительном механизме;
- для уменьшения затрат электрической энергии в электромеханическом исполнительном механизме с ШД при слежении необходимо увеличивать дискретный шаг перемещения (уменьшение шага перемещения приводит к увеличению потребления электрической энергии электромеханическим исполнительным механизмом);
- при уменьшении освещенности (в несколько раз) выработка энергии СБ падает и повышение точности слежения в системе не приводит к существенному увеличению выработки энергии.

Возникает противоречие в постановке и решении задачи: повышение точности слежения ведет к увеличению энергопотребления электромеханическим исполнительным механизмом, а увеличение шага перемещения при слежении ведет к уменьшению точности слежения. Таким образом, возникает необходимость поиска наилучшего решения данной задачи. Из вышеприведенного анализа следует: чем выше освещенность, тем меньше необходимо делать шаг перемещения, например, при максимальной освещенности делать шаг перемещения 1 градус, при уменьшении освещенности в 5 раз увеличивать дискретность перемещения

до 3 градусов. На рисунке 3.6 приведен график изменения дискретного шага перемещения в зависимости от освещенности.

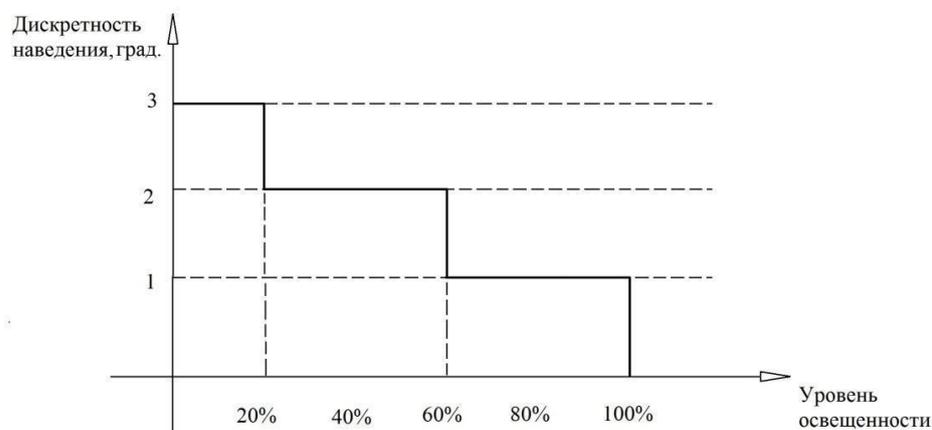


Рисунок 3.7 – График изменения дискретного шага перемещения

В датчике положения солнца (далее ДПС) приняты следующие обозначения:  $I_{\phi 1}$ ,  $I_{\phi 3}$  и  $I_{\phi 2}$ ,  $I_{\phi 4}$  – токи в противоположных гранях фотоэлементов датчика;  $I_{\phi 5}$  – ток в тыловой части фотоэлемента датчика,  $I_{\phi 6}$  – ток фотоэлемента в верхней грани усеченной пирамиды. При измерении токов в ДПС в микроконтроллере КСС осуществляется фильтрация (усреднение) значения токов фотоэлементов, а именно в течение секунды происходит 60 опросов тока граней ДПС и усреднение значений тока. Это необходимо для исключения случайных изменений освещенности (например, возможное случайное затенение ДПС от пролета птицы, вертолета и т.д.) и уменьшения уровня помех. Также в КСС есть аналоговая фильтрация на операционных усилителях, подключенных к фотоэлементам ДПС. Средние значения тока в противоположных гранях фотоэлементов датчика рассчитываются по следующим формулам:

$$I_{cp1} = \frac{I_{\phi1} + I_{\phi3}}{2} \quad 3.5$$

$$I_{cp2} = \frac{I_{\phi2} + I_{\phi4}}{2} \quad 3.6$$

Среднюю текущую освещенность  $E_1$  можно представить, как среднее значение токов в противоположных гранях ДПС, приведенное в относительных единицах (по сравнению с максимальным током фотоэлемента датчика при максимальной освещенности), по следующей формуле:

$$E_1 = \frac{I_{cp1} + I_{cp2}}{2I_{max}} \quad 3.7$$

где  $I_{max}$  – максимальное значение тока фотоэлемента датчика.

В таблице 2.1 для примера приведены энергетические характеристики системы при изменении дискретного шага перемещения [21], показывающие, что уменьшение величины дискретного шага перемещения (угла перемещения) приводит к увеличению потребляемой электрической энергии.

Таблица 3.6 - энергетические характеристики системы при изменении дискретного шага перемещения.

№	Скорость (Гц)	Ускорение (шаг/с <sup>2</sup> )	Торможение (шаг/с <sup>2</sup> )	Время (с)	Ток рабочий (А)	Ток пусковой (А)	Потребляемая я мощность (Вт)	Потребляемая энергия (Вт·ч)
1	3000	3000	3000	0,9	1	1,4	29,4	0,092
2	3000	3000	3000	1,3	1	1,4	29,4	0,0637
3	3000	3000	3000	1,67	1	1,4	29,4	0,049

Примечание: № 1 с дискретным шагом перемещения 2 градуса; эксперимент № 2 с дискретным шагом перемещения 3 градуса; эксперимент № 3 с дискретным шагом перемещения 5 градусов.

Алгоритм слежения с использованием датчика положения Солнца заключается в следующем: если токи в фотоэлементах противоположных граней пирамиды фотодатчика ( $I_{\phi 1}$ ,  $I_{\phi 3}$  и  $I_{\phi 2}$ ,  $I_{\phi 4}$ ) равны, то перемещать раму с СБ не требуется, а если есть отличие, то необходимо провести перемещение рамы с СБ (с закрепленным на ней датчиком положения Солнца) в таком направлении, чтобы компенсировать эту разницу по току. Если два противоположных фотоэлемента (в противоположных гранях усеченной пирамиды) у датчика положения Солнца показывают одинаковый ток, то датчик положения Солнца (и соответственно СБ) точно наведен на Солнце или находится в тени и перемещение рамы производить не требуется. Если тыловой фотоэлемент датчика положения Солнца ( $I_{\phi 5}$ ) выдает самый большой ток, то Солнце светит с обратной стороны рамы и необходимо развернуть раму в направлении Солнца. Это происходит на следующий день после восхода Солнца.

Вышеописанный алгоритм слежения поясняется ниже. Среднее значение тока (ток в гранях фотоэлементов ДПС) определяется по формулам (3.1) и (3.2). Расчет относительной ошибки положения по азимуту выполняется по следующей формуле:

$$\Delta I_2 = \frac{I_{\phi 1} - I_{\phi 3}}{1} \quad 3.8$$

При  $\Delta I_1 > 0$  идет отставание действительной траектории и необходимо делать перемещение (слежение за Солнцем) при выполнении условия

$$\Delta I_1 \geq K_{3н} \quad 3.9$$

При этом происходит перемещение по азимуту с формированием заданной траектории позиционирования на заданный угол. При условии  $\Delta I_1$

$>0$  происходит опережение действительной траектории по азимуту и перемещать раму с СБ не нужно.

При условии:

$$\Delta I_1 \leq K_{3н} \quad 3.10$$

рама с СБ наведена с заданной точностью на Солнце.

При выполнении условия:

$$I_{\phi 1} \leq I_{\phi 3} \leq I_{\phi 5} \quad 3.11$$

перемещения нет и рама с СБ находится в тени.

Выполнение условий:

$$\begin{cases} I_{\phi 5} > I_{\phi 1} \\ I_{\phi 5} > I_{\phi 2} \\ I_{\phi 5} > I_{\phi 3} \\ I_{\phi 5} > I_{\phi 4} \end{cases} \quad 3.12$$

означает, что Солнце светит с обратной стороны рамы и необходимо выполнить разворот рамы (по азимуту) в начальное положение.

Разворот рамы с СБ по азимуту осуществляется при максимально возможной скорости вращения ШД. При подходе к заданному положению (когда ошибка уменьшается до 0,5 градуса) происходит торможение с пониженной скоростью и ускорением.

Расчет относительной ошибки положения по углу места определяется по следующей формуле:

$$\Delta I_2 = \frac{I_{\phi 2} - I_{\phi 4}}{I_{cp2}} \quad 3.13$$

Перемещение рамы осуществляется, когда относительная ошибка  $\Delta I_2$  превысит заданную относительную величину ошибки, определяемую как зона нечувствительности  $K_{зн}$ .

При выполнении условия

$$\Delta I_2 \geq K_{зн} \quad 3.14$$

раму с СБ необходимо перемещать вверх, при этом происходит формирование алгоритма перемещения на заданный угол.

При выполнении условия

$$\Delta I_2 \leq -K_{зн} \quad 3.15$$

раму с СБ необходимо перемещать вниз, при этом происходит формирование алгоритма перемещения на заданный угол.

При выполнении условия

$$-K_{зн} < \Delta I_2 < K_{зн} \quad 3.16$$

рама с СБ не перемещается и она точно наведена на Солнце или находится в тени.

Величина коэффициента зоны нечувствительности может выбираться исходя из 5–10 % зоны при определении окончания переходного процесса по управляющему воздействию [22]. Однако при перемещении на 1 градус и коэффициенте зоны нечувствительности 5–10 % требуется обеспечить

чувствительность датчика положения Солнца 0,05–0,1 градуса, что трудно реализуемо в датчиках положения Солнца.

Поэтому для исключения большой величины перерегулирования по положению при слежении и возможности реализации ДПС значение коэффициента зоны нечувствительности  $K_{зн}$  должно быть не более 25 % от заданной величины перемещения. Учитывая, что перемещение происходит дискретно на 1–3 градуса по обеим координатам, значение коэффициента зоны нечувствительности  $K_{зн}$  должно быть переменным в зависимости от заданной величины перемещения, которая в свою очередь зависит от текущей освещенности. В таблице 2.3 приведено изменение значения коэффициента зоны нечувствительности  $K_{зн}$ , рассчитанного по формуле

$$K_{зн} = \begin{cases} 0,25^\circ & \text{при } E = (100 - 60)\% \text{ от } E_{max} \\ 0,5^\circ & \text{при } E = (60 - 20)\% \text{ от } E_{max} \\ 0,75^\circ & \text{при } E = (20 - 0)\% \text{ от } E_{max} \end{cases} \quad 3.17$$

где  $E_1$  – значение текущей освещенности;  $E_{MAX}$  – максимальная освещенность.

Таблица 3.7 – Изменение значения коэффициента зоны нечувствительности

Дискретность заданного перемещения в режиме слежения СБ за Солнцем, градус	1	2	3
Точность перемещения, %	25	25	25

Величина текущей освещенности от максимальной, %	100–60	60–20	20–0
Значение коэффициента зоны нечувствительности, градус	0,25	0,5	0,75

На рисунке 3.7 показана функциональная схема системы с учетом алгоритма слежения по таблице 3.4.

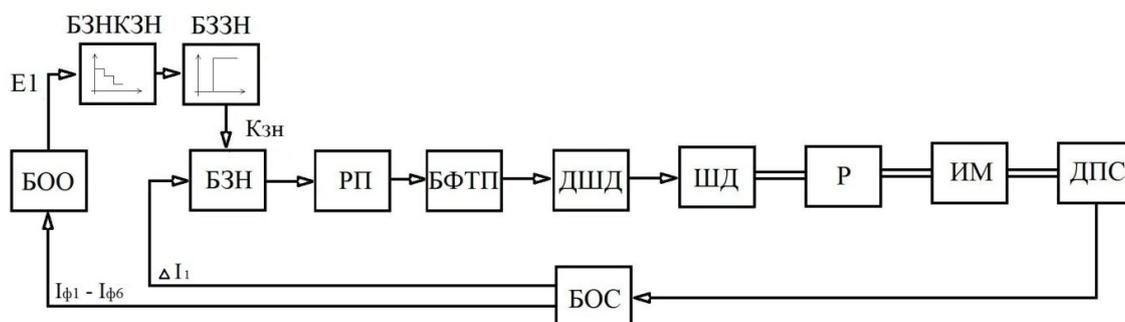


Рисунок 3.8 – Функциональная схема системы слежения с учетом изменения коэффициента зоны нечувствительности

На рисунке 3.8 приняты следующие обозначения: БЗНКЗН – блок задания нелинейного коэффициента зоны нечувствительности; ДШД – драйвер шагового двигателя; ШД – шаговый двигатель; Р – редуктор; ИМ – исполнительный механизм; ДПС – датчик положения Солнца; БОС – блок обратной связи; БОО – блок определения освещенности; БЗЗН – блок определения зоны нечувствительности; БЗН – блок задания нелинейного коэффициента зоны нечувствительности; РП – регулятор положения; БФТИ – блок формирования траектории позиционирования;  $K_{зн}$  – коэффициент

зоны нечувствительности;  $E1$  – средняя текущая освещенность, рассчитанная (измеренная) по ДПС;  $\Delta I_1$  – относительная величина ошибки положения по азимуту;  $I_{\phi 1}, I_{\phi 2}, I_{\phi 3}, I_{\phi 4}$  – токи в наклонных плоскостях ДПС.

Регулятор положения (РП) можно представить, как релейный элемент с изменяемой величиной зоны нечувствительности по формуле

$$U_{\text{ВЫХ РП}} = \begin{cases} U_{\text{max}} & \text{при } U_{\text{ВХ}} < -K_{\text{ЗН}} \\ 0 & \text{при } -K_{\text{ЗН}} < U_{\text{ВХ}} < K_{\text{ЗН}} \\ +U_{\text{max}} & \text{при } U_{\text{ВХ}} > K_{\text{ЗН}} \end{cases} \quad 3.18$$

где  $U_{\text{ВХ}}$  – входной сигнал;  $U_{\text{ВЫХ РП}}$  – выходной сигнал;  $K_{\text{ЗН}}$  – величина зоны нечувствительности релейного элемента.

На рисунке 3.8 показана его характеристика.

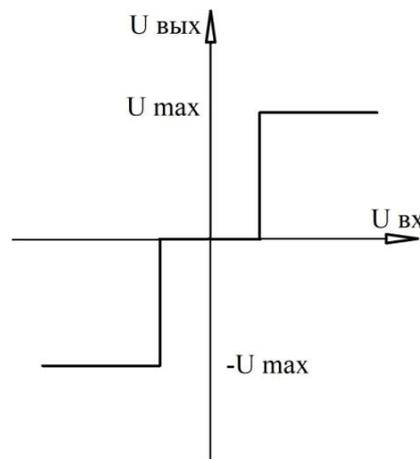


Рисунок 3.9 – Характеристика регулятора положения

Характеристика блока зоны нечувствительности определяется по таблице 3.7 и ее величина пропорциональна текущей освещенности  $E1$ , которая определяется по формуле 3.19. Ее можно представить, как внешнее возмущающее воздействие в виде

$$K_{3n} = K_2 * E_1, \quad 3.19$$

где  $K_2$  – коэффициент передачи блока определения зоны нечувствительности.

При перемещении рамы с СБ окончание режима перемещения на заданный угол в режиме позиционирования (окончание реальной траектории отработки заданного перемещения) может опережать или отставать от времени окончания расчетной траектории. Поэтому предложен алгоритм коррекции траектории, обеспечивающий существенное уменьшение перерегулирования по положению. Алгоритм коррекции траектории приведен на рисунке 3.9.



нечувствительности, необходимо произвести коррекцию положения рамы путем введения дополнительного задания на перемещение. Предлагается вводить корректирующую траекторию, равную 0,5 градуса по положению. Задание на корректирующую траекторию возможно формировать несколько раз в микроцикле слежения до полной компенсации ошибки по положению. Общий алгоритм слежения за Солнцем приведен на рисунке 3.10.

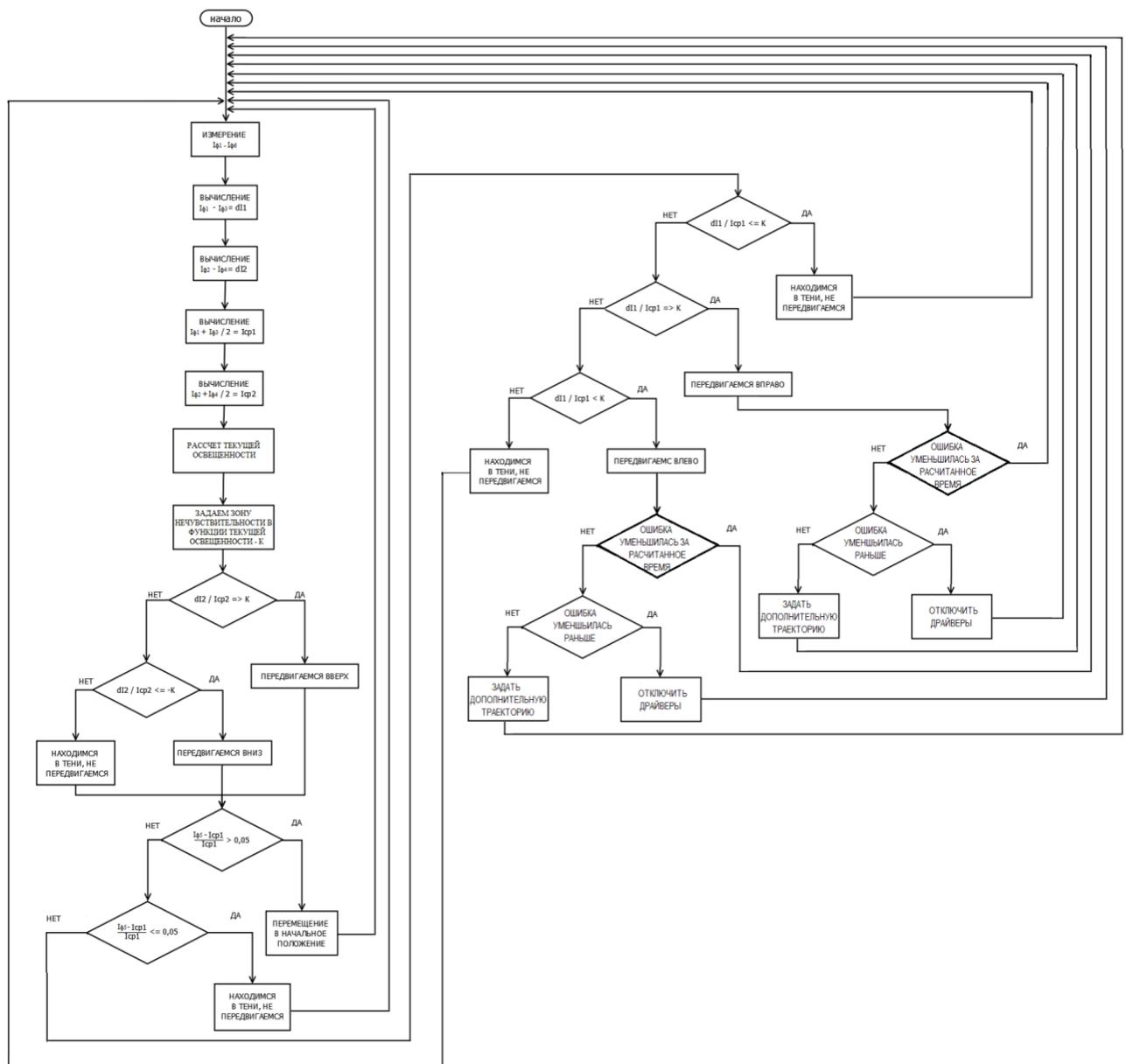


Рисунок 3.11 – Алгоритм слежения за Солнцем

В предложенной структурной схеме АСУ слежения за Солнцем в прямом канале необходимо применить релейный элемент с изменяемой величиной зоны нечувствительности. В условиях низкой освещенности (ДПС и СБ) в самой системе слежения ухудшается соотношение сигнал/шум [23] (шум – это фоновая засветка, отраженный сигнал света от посторонних предметов, шумы и наводки от длинного кабеля (установка с СБ может находиться в 20 м от контроллера слежения) и другое). Поэтому увеличение зоны нечувствительности, а именно значения коэффициента зоны нечувствительности  $K_{zn}$  при уменьшении текущей средней освещенности  $E_1$  приводит к улучшению фильтрации в системе АСУ слежения за Солнцем и к уменьшению ошибки от сигнала помех. Указанное выше позволило разработать алгоритм слежения СБ за Солнцем при использовании датчика положения Солнца, имеющего нелинейную характеристику блока зоны нечувствительности (изменяемую в функции освещенности) при определении необходимости режима перемещения.

### 3.8 Расчет фотоэлементов и узлов связи

Площадь фотоэлементов ДПС можно рассчитать по следующей формуле [23, 24]:

$$S = \frac{I_m}{K_i E_n} \quad 3.20$$

где  $I_m$  – максимальный ток фотоэлементов ДПС;  $K_i$  – значение коэффициента интегральной чувствительности [25, 26];  $E_n$  – уровень солнечной освещенности.

Максимальное значение тока фотоэлементов ДПС  $I_m$  целесообразно брать не более 100–200 мА, чтобы не увеличивать площадь фотоэлементов и соответственно габариты ДПС. Минимальной освещенностью, при которой ДПС должен проводить измерение, можно считать 200 Вт/м<sup>2</sup>. Коэффициент интегральной чувствительности  $K_i = 10$  мА/лм.

Рассчитанная по формуле (3.20) площадь должна составлять не менее 10 см<sup>2</sup>. При этой площади фотоэлементов датчик должен обеспечивать возможность измерения перемещения не менее 0,5 градуса по положению при уменьшении освещенности в 10 раз от максимальной.

Проведен расчет узла связи фотоэлементов блока датчиков положения Солнца с микроконтроллером. Параметры фотоэлемента блока положения Солнца: выходное напряжение при максимальной освещенности – 0,5 В; выходной максимальный ток – 100 мА. Величина сопротивления нагрузочного резистора выбирается по следующей формуле:

$$R_H = \frac{U_d}{I_d} = \frac{0,5\text{В}}{0,1\text{А}} = 5 \text{ Ом} \quad 3.21$$

где  $U_d$  – напряжение фотоэлемента;  $I_d$  – ток фотоэлемента. Выбран прецизионный (высокоточный термостабильный) резистор типа С2-29В-0,125 Вт номиналом 5,1 Ом с точностью 0,1 %. Выполнен расчет коэффициента усиления операционного усилителя, обеспечивающего усиление сигнала с фотоэлементов блока датчика положения Солнца. Напряжение на выходе операционного усилителя не должно быть выше опорного (внутреннего) напряжения микроконтроллера STM32F372VCT6, а именно  $U_{оп} = 2,56$  В. Коэффициент усиления рассчитывается по следующей формуле:

$$K_{ус} = \frac{U_{оп}}{U_d} = \frac{2,56\text{В}}{0,5\text{В}} = 5,12 \quad 3.22$$

где  $U_{оп}$  – опорное напряжение.

### 3.9 Расчет элементов платы управления

Для данной конструкции была выбрана плата управления для устройства слежения, способная регулировать положение плоскости солнечного устройства по обоим осям которая подходит к используемым устройствам и является надежной и экономически целесообразной.

Для схемы слежения примем плату управления с 8– битным FLASH микроконтроллером серии PIC16F887-I/PT [27]. Электрическая схема платы управления показана на рис. 3.11.

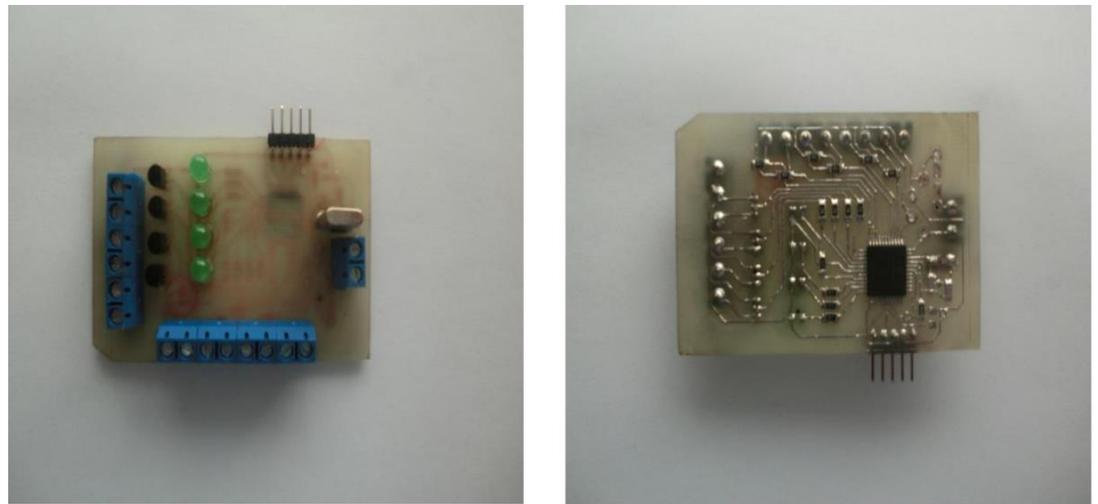


Рис. 3.12 - Общий вид платы управления устройством слежения за солнцем

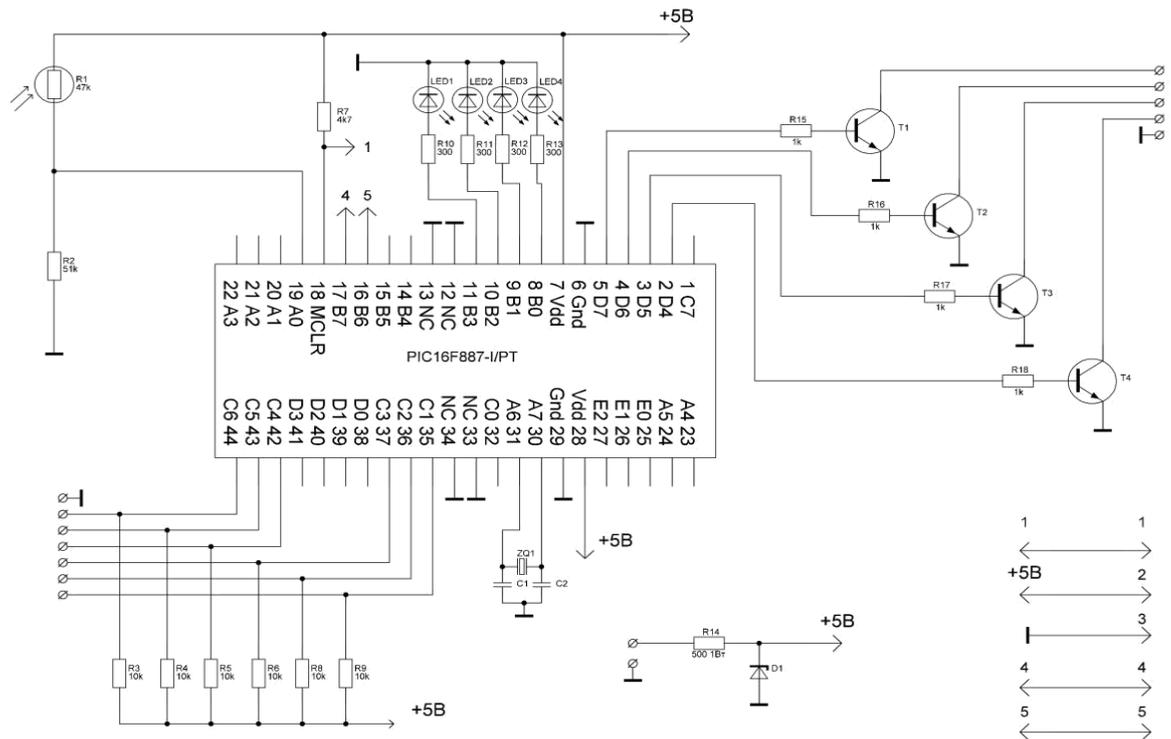


Рис. 3.13 - Электрическая схема платы управления устройством слежения за солнцем

Ниже представлены расчеты элементов для платы управления.

Расчет резисторов  $R_{15-18}$ . Транзисторы необходимы для подачи напряжения на катушку реле, контакты которого запускают в работу электрические привода. Напряжение питания реле  $U_{BH} - 24 \text{ В}$ , сопротивление реле  $R_{реле} - 200 \text{ Ом}$ . Отсюда следует, что ток, проходящий по транзистору:

$$I_{mp} = \frac{U_{BH}}{R_{реле}} \text{ А}$$

3.23

$$I_{mp} = 24/200 = 0,12 \text{ А}$$

Коэффициент усиления по току  $K_y$  транзистора 2N551, принимаем равным 30. На базу транзистора необходимо подать ток:

$$I_b = \frac{I_{mp}}{K_y} \text{ A} \quad 3.24$$

$$I_b = 0,12/30 = 0,004 \text{ A}$$

Напряжение на ножках микроконтроллера  $U_{мк}$  – 5 В. Рассчитаем необходимый номинал резистора, для того чтобы на базе транзистора создать ток 0,004 А:

$$R_{15-18} = \frac{U_{мк}}{I_b} \text{ Ом} \quad 3.25$$

$$R_{15-18} = 5/0,004 = 1.25 \text{ Ом}$$

Расчет резисторов  $R_{10-13}$ . Напряжение на светодиоде  $U_{св}$  – 2,3 В, ток светодиода  $I_\phi$  – 20 мА. Рассчитаем величину, на которую необходимо понизить напряжение микроконтроллера – 5 В, для того чтобы запитать диоды:

$$\Delta U = U_{сх} - U_{св} \text{ В} \quad 3.26$$

$$\Delta U = 24 - 2.3 = 21.7 \text{ В}$$

Необходимый номинал резистора:

$$R_{10-13} = \frac{\Delta U}{I_\phi} \text{ Ом} \quad 3.27$$

$$R_{10-13} = 21.7/0.02 = 1.085 \text{ кОм}$$

Для защиты выхода микроконтроллера от короткого замыкания на светодиоде необходимо, чтобы потребление тока диодом не превышало нагрузочной способности микроконтроллера [28]  $I_{\text{наг.мк}} = 20$  мА.

$$R_{10-13} = \frac{U_{\text{мк}}}{I_{\text{наг.мк}}} \text{ Ом} \quad 3.28$$

$$R_{10-13} = 5/0.02 = 250 \text{ Ом}$$

Расчет резисторов  $R_{3-9}$ . Резисторы  $R_{3-9}$  применяются для исключения ложных срабатываний, сопротивление каждого резистора составляет 10 кОм.

Расчет резистора  $R_2$ . Фоторезистор  $R_1$  в темноте имеет сопротивление 47 кОм, на свету – 10 кОм. Поэтому резистор  $R_2$  выбран так, чтобы напряжение на входе изменялось от 2,6 В до 4,1 В.

Расчет резистора  $R_{14}$ . Напряжение блока питания надо уменьшить на величину:

$$\Delta U = U_{\text{вн}} - U_{\text{вх}} \text{ В} \quad 3.29$$

$$\Delta U = 4.1 - 2.6 = 1.5 \text{ В}$$

С учетом того, что одновременно могут быть открыты только один транзистор и 2 светодиода, схема потребляет не более 50 мА. Сопротивление резистора будет равно:

$$R_{14} = \frac{\Delta U}{I_{\text{сх}}} \text{ Ом} \quad 3.30$$

$$R_{14} = 1.5/0.05 = 30 \text{ Ом}$$

## **Выводы**

1. Предложена и обоснована конструкция двухосной системы ориентирования её составных частей и параметров.
2. Рассчитаны моменты инерции конструкции от собственного веса и от ветровой нагрузки. Предложены варианты безопасной работы конструкции.
3. Приведен и обоснован выбор гелиотрекера.
4. Разработан алгоритм работы устройства слежения с учетом коэффициента нечувствительности для максимально энергоэффективной работы.
5. Приведен расчет фотоэлементов и узлов связи, а также выбрана и рассчитана плата управления.

## РАЗДЕЛ 4. ЭКОНОМИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ

### 4.1 Обоснование и задачи экономического расчета

В дипломной работе поставлена задача предложить и обосновать конструкцию двухосной системы ориентирования с солнечными панелями. Кроме технологического расчета в данном вопросе очень важной частью является экономический расчет, так как основной задачей установки является реализация своих мощностей с целью получения прибыли и если конструкция экономически не целесообразна, то использовать ее нет смысла.

Использование двухосной системы ориентирования даст возможность производить максимальное количество электроэнергии, позволяет полноценно использовать излучение солнца, значительно увеличивает эффективность работы солнечных панелей. Оборудование внутри конструкции нужно выбирать исходя из технической и экономической целесообразности, необходимо рассчитать микроконтроллер, фотодатчик и узлы связи, предложить алгоритм работы установки, предложить меры по безопасной и долгосрочной работе установки.

В данной работе нам необходимо создать систему ориентирования для четырех солнечных панелей, что требует не значительного количества используемого оборудования. В ходе работы не был прописан программный алгоритм работы, поэтому предполагается учитывать работу программиста по переводению алгоритма в программный код, так же не были выбраны кабели поэтому в экономическом расчете взяты усредненные цены на подходящие виды кабелей и некоторых других вещей, что, впрочем, практически не влияет на результаты расчетов.

В экономической части нам необходимо в первую очередь рассчитать стоимость работы по конструированию установки учитывая цену каждого элемента, стоимость рабочей силы.

## 4.2 Расчет стоимости конструирования двухосной системы ориентирования солнечных панелей.

Для создания установки привлекаются сотрудники предприятия, расчет производится из их стандартной заработной платы, по времени, затрачиваемому на операции. Отдельно учитываем стоимость монтажа конструкции по рыночной цене, из-за сложности собственной оценки трудоемкости такой процедуры.

Выражение для расчета затрат на изготовление  $Z$

$$Z = (M + O) + Z_0 + Z_d + ЕСВ + Н$$

Расчет затрат ( $Z$ ) производится на основании плановой калькуляции и включает следующие элементы:

- 1)  $M + O$  - основные материалы, необходимые для производства стенда и спецоборудование;
- 2)  $Z_0$  – основная заработная плата;
- 3)  $Z_d$  - дополнительная заработная плата;
- 4) ЕСВ – единый социальный взнос;
- 5)  $H$  - накладные расходы

В таблице 4.1 представлена стоимость основного оборудования и расходных материалов, использованных при проведении работ по изготовлению установки.

Таблица 4.1 Ведомость расхода материалов и спецоборудования создаваемой конструкции

№ п/п	Наименование	Количество	Цена за единицу, грн.	Сумма, грн.
1	Шаговый двигатель ШД -5Д [29]	2	1250	2500

2	Драйвер KND BD3H [30]	1	100	2500
3	Кабели [31]	8	15*8	720
4	Гелиотрекер AEDR-8300-1K2 [32]	1	270	270
5	Микроконтроллер PIC16F887-I/PT [33]	2	105	210
6	Резистор C2-29B-0,125 [34]	2	50	100
7	Солнечная панель KSM 180 [35]	4	6000	24000
8	Стальная конструкция [29]	1	2 500	2500
Итого				32,800

Дорогостоящее оборудование предлагается доставить бесплатно (солнечные панели), для остального учтем найм автомобиля для перевозки грузов для доставки от отделения почты – 500 грн. [36]

Стоимость остальных работ посчитаем по цене работы персонала, выполняющего монтаж.

Заработная плата рассчитывается для инженера – электронщика по стоимости человек – час в таблице 4.2.

Заработная плата  $Z_0$  рассчитывается по выражению

$$Z_0 = T_j * C_{\text{час}}$$

Где  $C_{\text{час}}$  – стоимость часа работы;

$T_j$  – время работы;

Стоимость часа работы определяется выражением:

$$C_{\text{час}} = \text{Оклад} / 8 * 22$$

Для инженера  $8000 / (8 * 22) = 45.08$  (грн/час)

Для программиста  $10000 / (8 * 22) = 56,81$  (грн/час)

Для Слесаря  $5000 / (8 * 22) = 28.4$  (грн/час)

Для грузчика  $5000 / (8 * 22) = 28.4$  (грн/час)

Таблица 4.2 – Расчет основной заработной платы

Наименование работы	Исполнитель	Трудоемкость (чел – час)	Заработная плата
Проектирование	Инженер	10	451
Монтаж оборудования	Инженер	10	451
Написание программного алгоритма	Программист	10	568
Вспомогательные работы	Слесарь	5	142
Разгрузочно-переносные работы	Грузчик	5	142

Итого стоимость работ  $451 + 451 + 568 + 142 + 142 = 1754$  (грн)

Дополнительная заработная плата

$Z_d = 0,1 * Z_0 = 0,1 * 1754 = 176$  (грн)

Единый социальный взнос

$ЕСВ = 0,22 * (Z_d + Z_0) = 0,22 * (1754 + 175) = 424$  (грн)

Накладные расходы

$H = 1,5 * (Z_d + Z_0) = 1,5 * (1754 + 175) = 2894$  (грн)

Таким образом, затраты на реализацию проекта составят:

$$З_{изг} = 32800 + 500 + 1754 + 176 + 424 + 2894 = 38\,548 \text{ (грн)}$$

### 4.3 Эксплуатационные расходы

Зараты на эксплуатацию установки составят:

$$C = C_a + C_{т.о.} + C_{пр}$$

Где  $C_a$  – амортизационные отчисления,  $C_{т.о.}$  – затраты на техническое обслуживание и текущий ремонт,  $C_{пр}$  – прочие расходы.

#### 4.3.1. Расчет амортизационных отчислений

Амортизация объекта основных средств начисляются исходя из срока его использования. Срок полезного использования объектов основных средств, для начисления амортизации берется не менее минимально допустимого срока, который указан в нормативных документах для каждой из групп основных фондов. Минимально допустимый срок полезного использования солнечных батарей составляет 12 лет.

Налоговым кодексом Украины разрешено использовать прямолинейный метод амортизации, при котором годовая сумма амортизации рассчитывается как отношение амортизируемой стоимости к сроку полезного использования объекта основных фондов.

$$C_a = \frac{З_{изг}}{T_{п}}$$

Получаем:

$$C_a = 38\,548 / 12 = 3\,212 \text{ (грн/год)}$$

4.3.2. Затраты на техническое обслуживание и текущий ремонт оборудования.

Фирмы производящие аналогичное оборудование предлагают гарантийное обслуживание в размере 200 грн на солнечную батарею и прикладное оборудование. 4 солнечных батареи обойдутся в 800 грн/год.

Так же примем затраты в размере 50 грн в месяц для обслуживающего персонала для проверки работоспособности устройства и протирки солнечных панелей от пыли.

$$\text{Итого: } C_{\text{то}} = 800 + 50 \cdot 12 = 1400 \text{ (грн/год)}$$

Прочие затраты (включают затраты по охране труда, и пр.) и рассчитываются в размере 4% от фонда заработной платы:

$$C_{\text{пр}} = 1400 \cdot 0.04 = 56 \text{ (грн/год)}$$

Итого:

$$C = 3212 + 1400 + 56 = 5668 \text{ (грн/год)}$$

#### 4.4 Годовая экономия

Данная установка практически не расходует электроэнергию, ее задачей является ее производство. По данным на январь 2018 года в Украине Зеленый тариф – 6,3 грн за Квт до конца 2019 года [37]

Используем стандартную формулу приблизительного расчета для солнечной батареи, а после пересчитаем ее по коэффициенту, полученному в второй главе.

Чтобы произвести расчет солнечной батареи воспользуемся формулой:

$$E = \frac{(I * K_o * V_{\text{мод}} * K_{\text{пот}})}{U_{\text{исп}}}$$

где:

$I$  — солнечная энергия, попадающая на поверхность Земли в горизонтальной плоскости. Для Днепра  $I = 1250 \text{ кВт}\cdot\text{ч}/\text{м}^2\cdot\text{год}$ .

$K_o$  — поправочный коэффициент пересчета суммарного потока солнечной энергии с горизонтальной плоскости на поверхность коллектора. Для Днепра этот коэффициент = 1.1.

$V_{\text{модуля}}$  — номинальная мощность солнечной батареи. Указывается в паспортных данных к модулю.

$K_{\text{пот}}$  — коэффициент, учитывающий потери солнечной батареи при преобразовании и передаче электроэнергии. Его принято считать 80 – 85 процентов. Примем для расчета 83.

$U_{\text{испыт}}$  — интенсивность солнечной радиации, при которой фотоэлектрические модули тестируются, то есть  $1000 \text{ Вт}/\text{м}^2$  ( $1 \text{ кВт}/\text{м}^2$ ). [38]

$$E = 1250 \times 1.1 \times 0.76 \times 0,83 / 1 = 967,35 \text{ (кВт}\cdot\text{ч/год)}$$

По результатам второй главы двухосная система ориентирования может дать нам в среднем 63 процентов прироста потребляемой энергии в сравнении с установкой без системы ориентирования.

$$E = 967,35 * 1.63 = 1561,23 \text{ кВт}\cdot\text{ч/год}$$

Итого доход за год:  $1561,23 * 6,3 = 9836 \text{ (грн/год)}$ .

#### 4.5 Расчет срока окупаемости

Расчет полного годового дохода:

$$E_{\text{год полн}} = E_{\text{год}} - C = 9836 - 5668 = 4168 \text{ грн/год}$$

Срок окупаемости проекта:

$$T_{\text{ок}} = \frac{K_{\text{пр}}}{E_{\text{год полн}}} = \frac{35548}{4168} = 8,52 \text{ лет}$$

#### **4.6 Выводы по разделу**

В разделе была рассчитана стоимость конструирования и установки двухосной системы ориентирования солнечных панелей, которая с учетом всех расходов на оборудование и работу составила 35548 грн.

Кроме этого были рассчитаны годовые доходы в случае продажи зеленой энергии, расходы на обслуживающий персонал, а также на ремонт оборудования, срок окупаемости проекта составил 8.52 лет.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе рассмотрено использование наиболее эффективных и экономически обоснованных способов повышения производительности солнечных панелей, лучшим из которых определен способ ориентирования батарей при помощи солнечных трекеров.

Для города Днепр было рассчитано что наиболее эффективной является двухосная система ориентирования, которая является более экономически обоснованной для использования чем батареи без систем ориентирования или с одноосной системой. Расчет показал, что выигрыш в мощности составляет до 63 процентов.

Конструкция, предложенная в третьей главе, является относительно недорогой и надежной за счет выбора предложенных элементов и позволяет с помощью приведенного алгоритма достаточно точно ориентировать панели на солнце по двум осям – по углу места и по азимуту.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Шиняков Ю.А., Шурыгин Ю.А., Аркатова О.Е. Повышение энергетической эффективности автономных фотоэлектрических энергетических установок // Электроника, Измерительная Техника, Радиотехника и Связь. Доклады ТУСУРа, № 2 (22), часть 2, декабрь 2010 – С. 102.
2. Попель О.С., Фрид С.Е., Альварес Г.М. К расчету поступления солнечной радиации на земную поверхность // Гелиотехника–1986.– №1–С.56.
3. Плеханов С.И., Наумов А.В. Оценка возможностей роста производства солнечных элементов на основе CdTe, CIGS и GaAs/Ge в период 2010-2025 г.г. [Электронный ресурс] – Режим доступа: AEnergy.ru
4. Наумов А.В., Плеханов С.И. Развитие солнечной энергетики на основе тонкопленочных CIGS-элементов // Энергия: экономика, техника, экология. - М., 2013. -№ 7. - С. 14.
5. Кузнецов Ф.А., Резниченко М.Ф. Кремний для солнечной энергетики// Материалы электронной техники. – 2008. – №4. – С.4.
6. Gay, CF and Wilson, JH and Yerkes Performance advantages of two-axis tracking for large flat-plate photovoltaic energy systems // Conf. Rec. IEEE Photovoltaic Spec. Conf 16.-1982.
7. Капля Е. В. Автоматическая система ориентации солнечной батареи в условиях переменной освещенности// Известия ВолгГТУ. – Волгоград – 2009.– №8(56)–. С.88.
8. Solarsoul [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://solarsoul.net/treker-dlya-fotoelektricheskix-ustanovok>
9. UST [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://ust.su/solar/media/section-inner79/3032>
10. Damm, J. An active solar tracking system // HomeBrew Magazine – 1990

11. Deger [Электронный ресурс] – Режим доступа:  
<http://www.degerenergie.de>
12. Солар [Электронный ресурс] – Режим доступа:  
<http://solarb.ru/solnechnye-batarei-na-povorotnykh-modulyakh>
13. Пантелеев В.Л. Физика Земли и планет // Курс лекций–М.: МГУ–2001.
14. Petrov L.A. Solar Tracking Strategies / BSc (Hons) Dissertation – University of DUNDEE 2010/2011 – 79p.
15. Аржанов, К.В. Двухкоординатная система наведения солнечных батарей на Солнце / К.В. Аржанов // Известия Томского политехнического университета. – 2014. – Т. 324. – № 4. – С. 139-146.
16. НПП Квант. URL. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.npp-kvant.ru>
17. Step Motor Driver KND BD3H-A [Электронный ресурс]. – Режим доступа:  
[http://www.knd.com.cn/templates/T\\_zhishi\\_en/detail.aspx?nodeid=164](http://www.knd.com.cn/templates/T_zhishi_en/detail.aspx?nodeid=164)
18. DM356M 3-Phase Stepper Driver--DM Series [Электронный ресурс].  
Режим доступа: <http://www.bsjd.com/en/productshowinfo.asp?id=837>
19. Вычисление момента инерции [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [http://www.sernam.ru/lect\\_f\\_phis2.php?id=265](http://www.sernam.ru/lect_f_phis2.php?id=265)
20. Соколов, В., Бабин, В., Соколов, Г., Эффект Саньяка - Классическое Объяснение [Электронный ресурс] – Режим доступа:  
<http://www.gsjournal.net/old/sokolov/sokolov16r.pdf> Электродвигатель шаговый ШД – 5Д1МУЗ. Технические условия: ТУ16 – 515.166.79.
22. Система следящая за солнцем для параболического концентрирующего солнечного водяного коллектора [Электронный ресурс] – Режим доступа:  
<http://www.delaysam.ru/dachastroy/dachastroy57.html>
23. ГОСТ 27803–91. Электроприводы регулируемые для металлообрабатывающего оборудования и промышленных роботов. – М. : Издательство стандартов, 1991.

24. Шидловский, С.В. Автоматизация технологических процессов и производств: учебное пособие / С.В. Шидловский. – Томск : Изд-во НТЛ, 2005. – 100 с.
25. Солнечная энергетика / В.И. Виссарионов, Г.В. Дерюгина, В.А. Кузнецова, Н.К. Малинин; под ред. В.И. Виссарионова. М. : Издательский дом МЭИ, 2008. – 276 с.
26. Китаева, М.В. Аппаратно-программный комплекс для контроля оптимальной ориентации фотоэлектрических модулей на максимальный поток солнечного излучения: дис. канд. техн. наук: 05.11.13 / Китаева Мария Валерьевна. – Томск, 2014. – 139 с.
27. Microchip [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://www.microchip.com/wwwproducts/en/PIC16F887>
28. Bibliofond [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://bibliofond.ru/view.aspx?id=599539>
29. Шаговый двигатель ШД -5Д [Электронный ресурс] – Режим доступа: [goo.gl/mJ3EPS](http://goo.gl/mJ3EPS)
30. Драйвер KND BD3H – 2500 грн [Электронный ресурс] – Режим доступа: [goo.gl/5QNHUP](http://goo.gl/5QNHUP)
31. Средняя цена кабелей [Электронный ресурс] – Режим доступа: [http://www.avtomats.com.ua/2728-aluminum\\_cable\\_avg.html](http://www.avtomats.com.ua/2728-aluminum_cable_avg.html)
32. Гелиотрекер [Электронный ресурс] – Режим доступа: [goo.gl/6J1PEC](http://goo.gl/6J1PEC)
33. Микроконтроллер [Электронный ресурс] – Режим доступа: [goo.gl/ZfWZDK](http://goo.gl/ZfWZDK)
34. Резистор [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://dp.prom.ua/Rezistory-s2-29.html>
35. Солнечная панель [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://www.solarroof.ru/products/6/36/>
36. Vitok [Электронный ресурс] – Режим доступа: [http://www.vitok-energo.ru/index\\_page\\_238.html](http://www.vitok-energo.ru/index_page_238.html)

- 37.SAEN [Электронный ресурс] – Режим доступа:  
<http://saen.com.ua/zeljonyj-tarif.html>
- 38.Solar soul [Электронный ресурс] – Режим доступа:  
<http://solarsoul.net/raschet-solnechnoj-batarei>
- 39.Атмосфера [Электронный ресурс] – Режим доступа:  
<https://www.atmosfera.ua/stati-geliosistemy/solar-insulation-ukraine/>