

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования  
«Тольяттинский государственный университет»

Институт машиностроения  
(наименования института полностью)

Кафедра «Промышленная электроника»  
(наименование)

11.03.04 Электроника и наноэлектроника  
(код и наименование направления подготовки, специальности)

Промышленная электроника  
(направленность (профиль) / специализация)

**ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА  
(БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА)**

на тему Автономный солнечный трекер

Студент	<u>И.Р. Шафиков</u> (И.О. Фамилия)	_____ (личная подпись)
Руководитель	<u>к.т.н., доцент А.В. Прядилов</u> (ученая степень, звание, И.О. Фамилия)	_____
Консультант	<u>к.п.н., доцент А.В. Кириллова</u> (ученая степень, звание, И.О. Фамилия)	_____

Тольятти 2020

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования  
«Тольяттинский государственный университет»

Институт машиностроения  
(наименование института полностью)

Кафедра Промышленная электроника  
(наименование)

**ЗАДАНИЕ**  
**на выполнение бакалаврской работы**

Студент Шафиков Ильяс Рустемович, Элб-1601а

1. Тема Автономный солнечный трекер

2. Срок сдачи студентом законченной выпускной квалификационной работы 6.07.2020

3. Исходные данные к выпускной квалификационной работе

Устройство хранения энергии: Аккумуляторная батарея 3,7 В

Солнечная панель мощностью: 4,5 Вт

Тип устройства: двухосевой

4. Содержание выпускной квалификационной работы (перечень подлежащих разработке вопросов, разделов)

Аннотация

Введение

1. Состояние вопроса.

1.1. Формулирование актуальности, цели и задач проекта

1.2. Анализ исходных данных и известных решений

2. Расчетная часть

2.1. Разработка электрической принципиальной схемы

2.2. Выбор элементов схемы

3. Программная часть

4. Экспериментальная часть

4.1. Изготовление макета установки

4.2. Отладка макета

4.3. Экспериментальные исследования

Заключение

Список используемой литературы

5. Ориентировочный перечень графического и иллюстративного материала

1. Обзорный лист

2. Структурная схема

3. Конструкция устройства

4. Схема электрическая принципиальная

5. Диаграммы работы устройства

6. Блок-схема алгоритма программы

6. Дата выдачи задания «28» февраля 2020 г.

Руководитель бакалаврской работы

\_\_\_\_\_  
(подпись)

А.В. Прядилов

\_\_\_\_\_  
(И.О. Фамилия)

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования  
«Тольяттинский государственный университет»

Институт машиностроения  
(наименование института полностью)

Кафедра Промышленная электроника  
(наименование)

**КАЛЕНДАРНЫЙ ПЛАН**  
**выполнения бакалаврской работы**

Студент И.Р. Шафиков

по теме Автономный солнечный трекер

Наименование раздела (главы)	Плановый срок выполнения раздела	Фактический срок выполнения раздела	Отметка о выполнении раздела (главы)	Подпись руководителя
Анализ актуальности проекта, написание введения и обзорной главы. Разработка структурной схемы разрабатываемого устройства	28.02.2020	24.04.2020		
Разработка электрической принципиальной схемы. Написание остальных разделов работы.	25.04.2020	29.05.2020		
Оформление пояснительной записки и плакатов	30.05.2020	3.07.2020		

Руководитель бакалаврской работы

\_\_\_\_\_ (подпись)

А.В.Прядилов

(И.О. Фамилия)

## Аннотация

Объем 41 с., 29 рис., 2 табл., 20 источников

Название выпускной квалификационной работы: «Автономный солнечный трекер»

Объектом ВКР является устройство слежения солнечных лучей и позиционирования солнечной панели для генерации электроэнергии с большим КПД, по сравнению со неподвижной солнечной панелью.

Цель работы: разработка системы слежения солнца и позиционирования солнечной панели.

Задачи работы:

1. Обзор существующих решений
2. Расчет параметров системы
3. Разработка силовой части схемы.
4. Разработка системы управления
5. Расчет схем и выбор элементов

В данной работе: произведены теоретические расчеты параметров системы и материалов, а также программное моделирование для слежения и управления позиционированием системы. Так же проделана конструкторская работа по сборки системы.

Данное устройство относится к источникам возобновляемой энергии и встречается в промышленности, гражданской энергетике.

Система, созданная для экспериментов в данной работе, является уменьшенным макетом станции генерации электроэнергии от солнечного света. Размеры, а также мощность станции имеет косвенное отношение к доказательствам рациональности использования технологии слежения солнца и позиционирования солнечной панели.

## **Abstract**

The title of the graduation work is « Standalone solar tracker ».

The graduation work consists of an explanatory note on 41 pages introduction, four parts, a conclusion, including 29 figures, 2 table, list of 20 references including 5 foreign sources, three appendices and the graphic part on 6 A1 sheets.

The key issue of this work is the development devices for tracking solar rays and positioning the solar panel to generate electricity with high efficiency, compared with a fixed solar panel. We touch upon the problem of obtaining solar energy, since it is affected by different weather conditions, under which the intensity of solar radiation varies, depending on the change in the angle between the sun's rays and the surface of the earth. This affects the energy production, thereby affecting the efficiency of the installation.

The aim of the work is the development of solar tracking system and solar panel positioning.

This work is divided into the following chapters: status of the issue; settlement part; software part; experimental part.

We report the results of theoretical calculations of the system's parameters and software modeling for tracking and controlling the positioning of the system. Also, the design work on the assembly of the system has been done.

In conclusion we'd like to stress that this topic of this work is one of the relevant directions in the alternative energy. The system created for experiments in this work can serve as a reduced model of a station for generating electricity from sunlight, the parameters of which can be evidence of the rationality of using the technology of tracking the sun and positioning the solar panel.

## Содержание

Введение.....	3
1. Состояние вопроса.....	4
1.1. Обзор существующих решений.....	6
2. Расчетная часть.....	9
2.1. Разработка электрической принципиальной схемы.....	9
2.2. Выбор элементов схемы.....	11
3. Программная часть.....	21
4. Экспериментальная часть.....	25
4.1. Изготовление макета установки.....	26
4.2. Отладка макета.....	30
4.3. Экспериментальное исследование.....	30
Заключение.....	35
Список используемой литературы.....	36
Приложение А Перечень элементов.....	38
Приложение Б Программный код.....	39

## Введение

В настоящее время проблемы энергетического дефицита, с которыми сталкивается мир, в особенности третьи страны мира, требуют найти альтернативный источник энергии, который бы дополнил обычное ископаемое топливо. Альтернативные источники энергии включают в себя солнечную, ядерную, а также ветер.

Идея преобразования солнечной энергии в электрическую с использованием фотоэлектрических панелей находится в одном ряду с другими возобновляемыми источниками.

Солнечная энергия - это энергия, генерируемая за счет использования энергии солнечного излучения. Солнечное излучение является самым чистым источником энергии, так как практически не загрязняет климат.

К сожалению, солнечная энергетика не отличается высоким коэффициентом полезного действия используемых в ней солнечных элементов, это ограничивает ее применение в регионах, где солнечная инсоляция значительно меняется с изменением времени года.

Постоянное изменение угла падения солнечных лучей относительно земли уменьшает мощность генерации энергии. Решить данную проблему поможет система отслеживания солнечного излучений. Солнечные трекеры перемещают солнечную панель перпендикулярно к солнцу в течение дня.

В ходе данной работы предполагается разработать действующий прототип солнечного трекера на базе платформы Arduino, который можно было бы использовать в качестве проектировочных решений для тестирования идей и изменения в направлении модернизации устройства.

Результатом работы является двухосный солнечный трекер и его описание, а также эксперименты со снятием показателей выработки солнечной энергии.

## 1. Состояние вопроса

Солнце излучает на землю примерно  $1,8 \cdot 10^{11}$  МВт энергии, что во много тысяч раз больше нынешнего уровня потребления на земле ото всех других используемых коммерческих источников энергии.

Основные проблемы с использованием солнечной энергии - ее разнообразная природа, разные пояса и угол между солнечными лучами и поверхностью земли. Даже в самых жарких регионах на Земле поток солнечной радиации редко превышает 1 кВт / м, что недостаточно для технологического использования. Эти проблемы могут быть устранены с помощью солнечного трекера, который обеспечивает максимальную интенсивность солнечных лучей, падающих на поверхность панели от восхода до заката солнца.

Орбита Земли вокруг Солнца почти круглая на среднем расстоянии 149,6 млн. км. Ось вращения Земли наклонена на угол  $\varepsilon = 23,441$  градусов по отношению к нормали и плоскости орбиты Земли. Плоскость орбиты Земли называется плоскостью эклиптики. Плоскость, проходящая через экватор Земли, наклонена перпендикулярно плоскости эклиптики, под углом  $\varepsilon$  (угол наклона). На основании закона сохранения момента импульса можно утверждать, что угловая высота над горизонтом будет меняться в течение года.

Для того, чтобы рассчитать углы падения солнца, необходимо определить подходящие системы отсчета. Можно использовать три основных системы отсчета: системы отсчета эклиптики, экватора и горизонта.

Эти системы отсчета центрированы или привязаны к центру. Солнце и другие небесные тела предполагается расположить на небесную сферу (рис.1)

## Постоянство наклона Земной оси

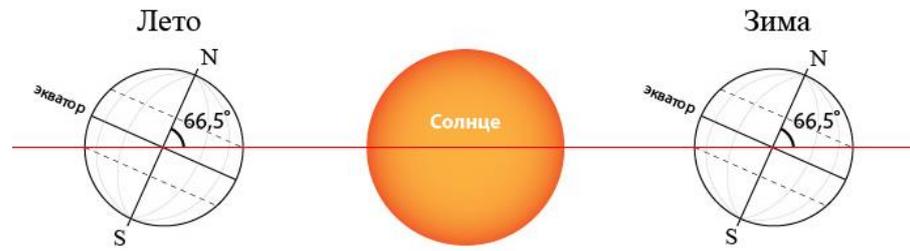


Рисунок 1. Сфера большого радиуса.

Предполагается, что небесная сфера вращается вокруг неподвижной. Ось Земли наклонена на  $23,34^\circ$  от плоскости земной орбиты вокруг Солнца, и период вращения Земли вокруг Солнца составляет один земной год.

21 декабря (зимнее солнцестояние) до  $23,45^\circ$  южной широты 21 июня (летнее солнцестояние).

Солнцестояние показывает максимальную высоту подъема Солнца над Землей. Угол измеряется между воображаемой линией между наблюдателем, солнцем и горизонтальной плоскостью, на которой стоит наблюдатель.

Угол высоты отрицательный, когда солнце опускается ниже горизонта

Это угловое расстояние между югом и проекцией прямой видимости солнца на земле. Положительный угол солнечного азимута указывает положение к востоку от юга, а отрицательный угол азимута указывает на запад с юга (рис.2).

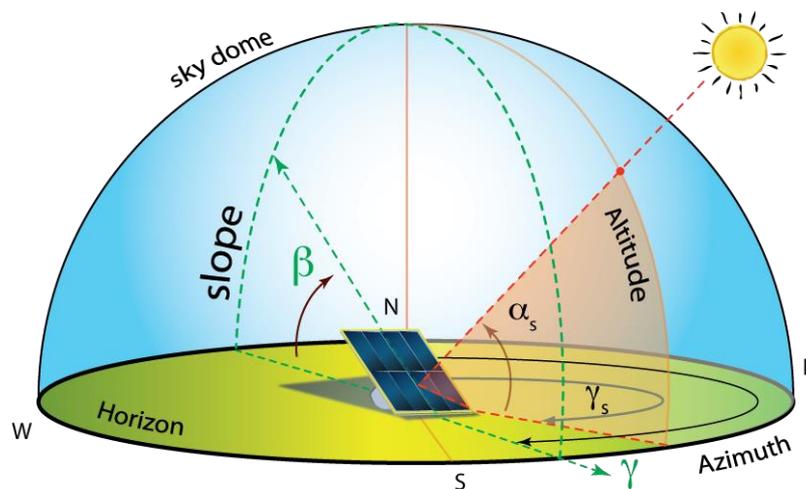


Рисунок 2. Углы солнечного азимута

Широта - это угол, образованный радиальной линией, соединяющей местоположение с центром земли и проекцией линии на экваториальную плоскость. Земная ось вращения пересекает поверхность земли на  $90^\circ$  широты (северный полюс) и  $-90^\circ$  широты (южный полюс). Любое местоположение на поверхности земли можно определить пересечением угла долготы и угла широты.

### 1.1. Обзор существующих решений

Основной механизм солнечной системы слежения состоит из устройства слежения, алгоритма слежения, блок управления, система позиционирования, приводного механизма и датчиков. Алгоритм отслеживания определяет углы, которые используются для определения положение солнечного трекера. Есть два типа алгоритмов - астрономические алгоритмы и алгоритмы интенсивности светового потока. Астрономический алгоритм - чисто математический алгоритм на основе астрономических показателей. Алгоритм интенсивности света в реальном времени основан на интенсивности света. Блок управления выполняет алгоритм отслеживания и управляет системой позиционирования и механизмом поворота. Система позиционирования отвечает за соответствие расположения солнечной панели к солнцу под расчетным углом. Она может быть, как одноосной, так и двухосной (рис.3).

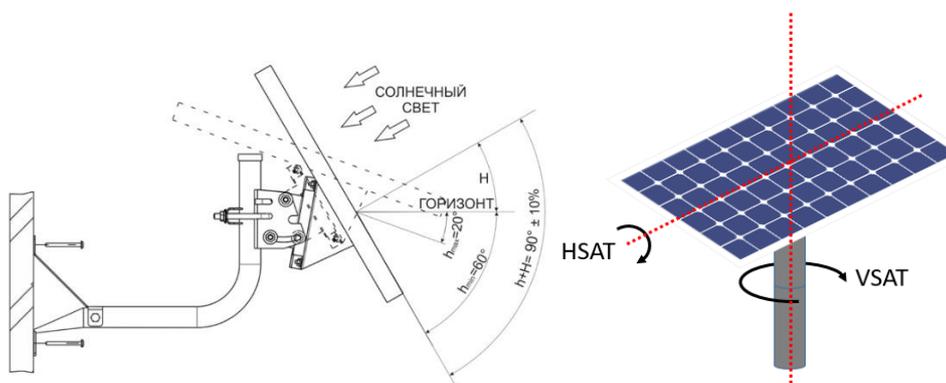


Рисунок 3. Двухосная и одноосная система позиционирования солнечного трекера.

Система позиционирования может быть электрической или гидравлической. Светочувствительные устройства представляют собой группу датчиков, которые измеряют условия окружающей среды и интенсивность света рис.4.

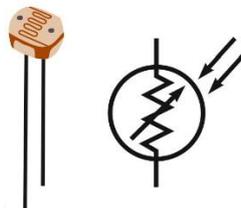


Рисунок 4. Фоторезистор

Они используются в случае слежения положения по интенсивности света.

Количество выходных данных в основном зависит от косинуса угла падения, который известен как угол между солнечным лучом и горизонтальной поверхностью. Минимальный угол падения дает максимальную выходную мощность. В случае неподвижной панели, максимальная мощность достигается только в полуденное время. Солнечный трекер может исправить эту проблему.

Первый солнечный трекер, представленный Финстером в 1962 году, был полностью механическим. Год спустя был представлен механизм с автоматическим электронным управлением при использовании пиргелиометра.

Tiberiu Tudorache и соавторы сравнили неподвижную панель с системой слежения с точки зрения выработки электрической энергии и эффективности. Предлагаемое устройство автоматически выполняет поиск оптимального положения фотоэлектрической панели относительно солнца с помощью двигателя постоянного тока, управляемого приводным блоком, который получает входные сигналы от специальных датчиков интенсивности света. Такой трекер производит больше энергии, чем фиксированная солнечная панель, примерно на 57,55%.

Такие трекеры используются для минимизации угла наклона между входящим солнечным светом и фотоэлектрической панелью. Масаказу Ито и соавторы предложили сравнительное исследование стационарных и трекинговых систем в крупномасштабных PV (VLS-PV) системах в пустыне. Работа была смоделирована.

В моделировании использовались временные ряды солнечного излучения и температуры, представляющие исторический рекорд за 18 лет (с 1994 по 2011). Результаты показывают, что одноосевой трекер с вертикальной осью с наклоном 30 градусов северной широты, как правило, получает на 15–35% больше электроэнергии по сравнению с зафиксированным при оптимальном угле наклона. Anyaka et al изучали улучшение фотоэлектрических систем выходной мощности с использованием методов солнечного слежения. В работе представлено подробное описание схемы систем отслеживания солнечного света, которая дает широкий спектр высокопроизводительных систем генерации солнечной энергии.

## **2. Расчетная часть**

Для формирования рабочей схемы устройства слежения за солнцем необходимо определить параметры системы. В целях демонстрации работы системы не требуется вырабатывать большое количество электричества солнечной панелью, поэтому размер фотоэлектрического полотна будет ограничен мощностью 5 Вт.

Чтобы солнечная панель перемещалась в двух осях, необходимо использовать как минимум два привода. Более детально выбор привода описан в разделе 2.2 данной работы.

Также система должна заряжаться из независимого источника. Аккумулятор должен удовлетворять потребности системы вне зависимости от вырабатываемой панелью энергией.

Функцией управления данной системы может являться алгоритм, заложенный в микросхему, или же программный код, скомпилированный через компьютер в контроллер. Для изучения алгоритмов солнечного трекера лучше выбрать вариант с контроллером, так как он дает больше возможных режимов и более наглядный.

### **2.1. Разработка электрической принципиальной схемы**

Для работы устройства нам требуются лишь шесть аналоговых входа для датчиков света и потенциометров, и два дискретных вывода для управления сервоприводом. Схема соединений должна включать в себя как сигнальные линии, так и линии питания.

Для регулировки светочувствительности необходимо использовать потенциометр, регулирующий сопротивление. Оно позволит откорректировать систему для более стабильной работы.

Для работы световых датчиков необходимо включить сопротивление в цепь.

Выработанный заряд должен переходить в аккумуляторную батарею, поэтому нужна плата, выполняющая функцию зарядного устройства.

Ниже представлена структурная схема устройства.

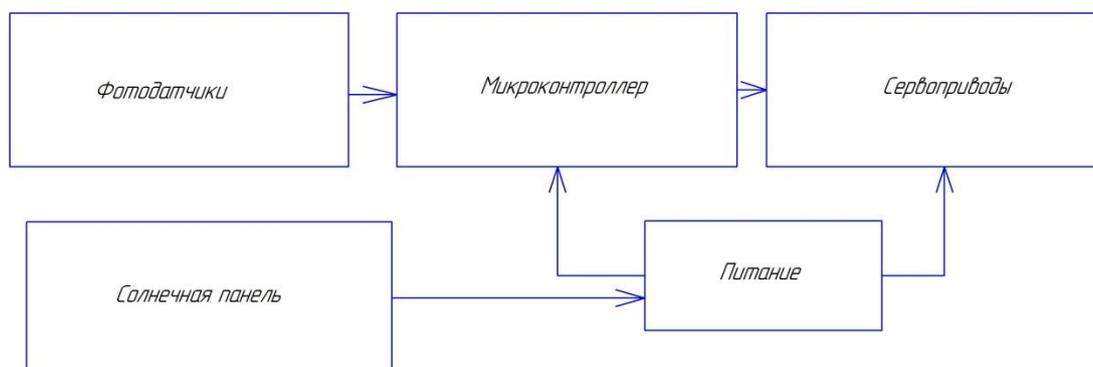


Рисунок 5. Структурная схема устройства

Данная схема показывает связь узлов устройства. Это нужно для формирования программного кода и логического построения электрических связей.

Все элементы схемы необходимо соединить в одну принципиальную схему. По центру должен располагаться контроллер Arduino, так как он является «мозгом» системы. Датчики и регулировка изображаются слева от контроллера. Исполнительные устройства изображаются по правую сторону от контроллера. На рисунке 6 представлена электрическая принципиальная схема устройства.

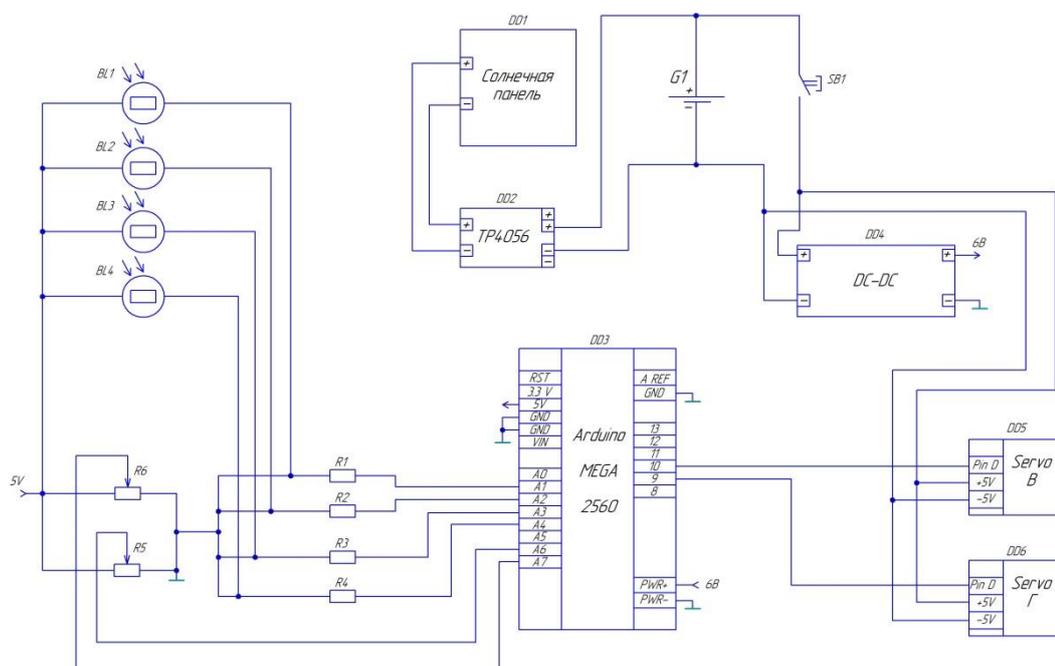


Рисунок 6. Схема электрическая принципиальная.

Соединение сервоприводов осуществляется через питание от аккумулятора. На сигнальный вход сервопривода подается сигнал pin от дискретного выхода контроллера.

Фоторезисторы обозначены BL1, BL2, BL3, BL4. Сопротивление обозначается буквой R соответственно. Для регулировки скорости сервоприводов установлен потенциометр с обозначением R5. Чтобы регулировать чувствительность светодиодов используется потенциометр R6.

## 2.2. Выбор элементов схемы

Основным элементом принципиальной схемы является контроллер Arduino MEGA. Контроллер имеет аналоговые и дискретные входы и выходы.

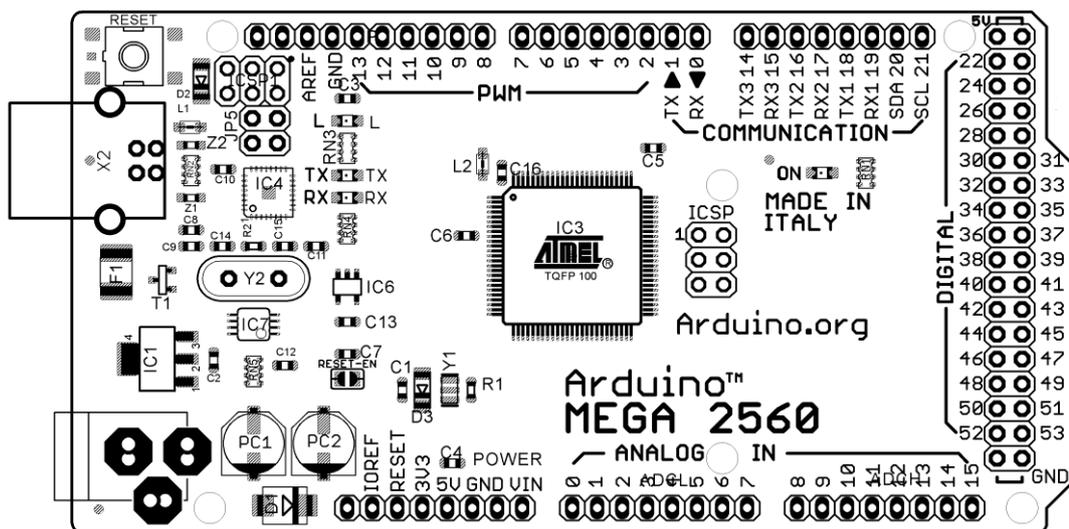


Рисунок 7. Arduino MEGA

Данная платформа создана на базе микроконтроллера ATmega2560. Платформу возможно запрограммировать без специального программатора. Она работает с использованием протокола STK500. Также можно запрограммировать микроконтроллер через ICSP при помощи ARDUINO ISP или другого устройства подобного функционала.

Код программного обеспечения доступен в репозитории разработчика. АТМЕГА загружается с загрузчиком DFU, который способен активироваться при помощи подсоединения перемычки на задней панели платы и сброса 8U2.

На платах более поздних версий есть резистор, тянущий линию 8U2/16U к заземлению, облегчающий переход в режим DFU.

В нашем случае можно использовать программатор на базе Windows через специальный кабель.

Плата имеет свою встроенную систему защиты от перенапряжения. Это, так называемая, плавка вставка. Она защищает порт USB компьютера от токов короткого замыкания. Большинство ПК имеют свою систему защиты от короткого замыкания, предохранитель обеспечивает дополнительную защиту.

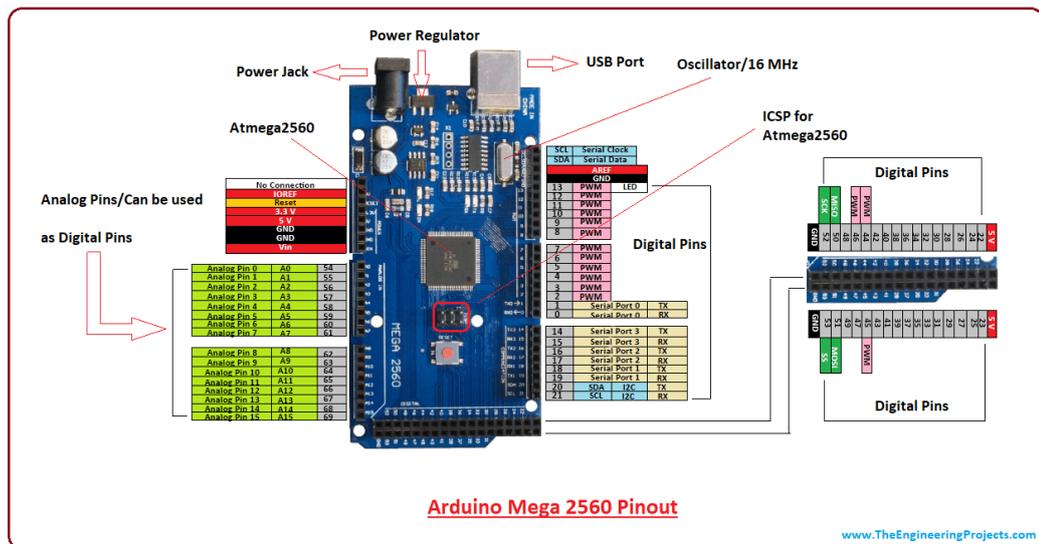


Рисунок 8. Схема платформы Arduino Mega 2560

Питание платформы может осуществляться от USB кабеля. Так же плата может питаться от аккумулятора. Провода питания необходимо подключать к штырям через отдельные провода. Это осуществляется через центральную положительную вилку диаметром 2,1 мм.

Внешний источник питания должен быть от 6 до 20 вольт. Однако, если напряжения будет не хватать, то выводы питания для датчиков и сервоприводов могут не выдавать 5 В. Так же работа может быть нестабильной. Напряжение выше 12 вольт может привести к перегоранию всей платы. Рекомендуемое напряжение для Arduino Mega составляет от 6 до 12 вольт.

Для изменения угла наклона солнечной панели к солнцу необходимо использовать приводы. Скорость вращения вала должна быть низкой.

Для управления панелью весом до 1 кг можно использовать Micro Servo SG90.

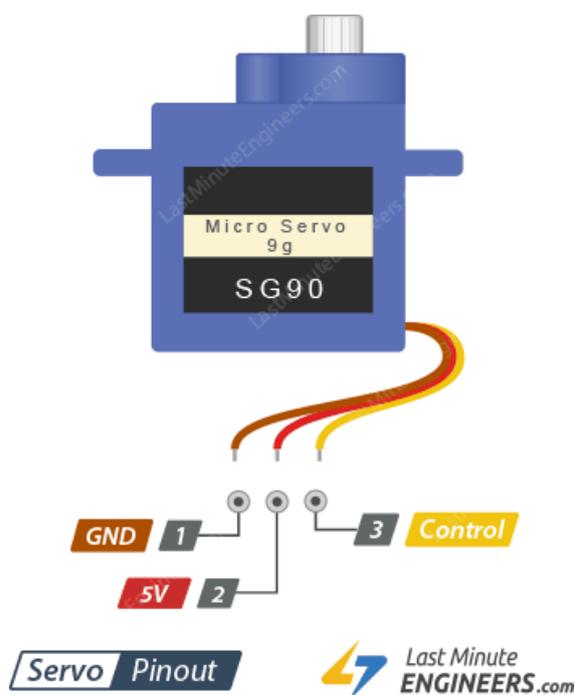


Рисунок 9. Micro Servo SG90

Название «Серво» обозначает лишь то, что он управляется замкнутым контуром.

Система замкнутого контура используется с сигналом обратной связи, для того чтобы регулировать скорость и направление движения двигателем.

Серводвигатель содержит маленький двигатель, работающий на постоянном токе, который соединяется с выходным валом посредством шестерни.

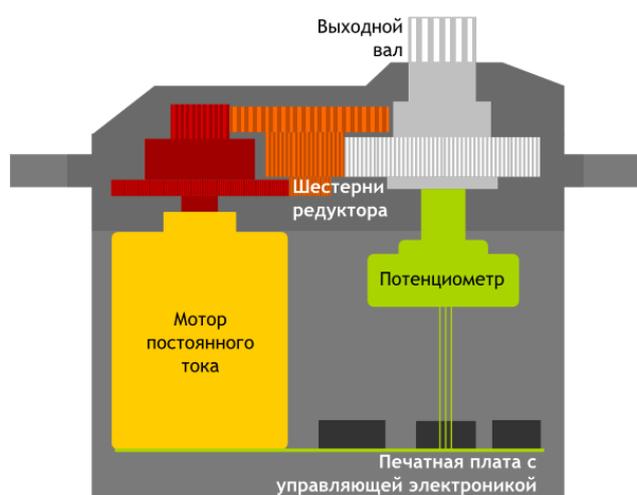


Рисунок 10. Устройство сервопривода.

Управляющий сигнал подается импульсным методом, то есть постоянной частоты и переменной ширины.

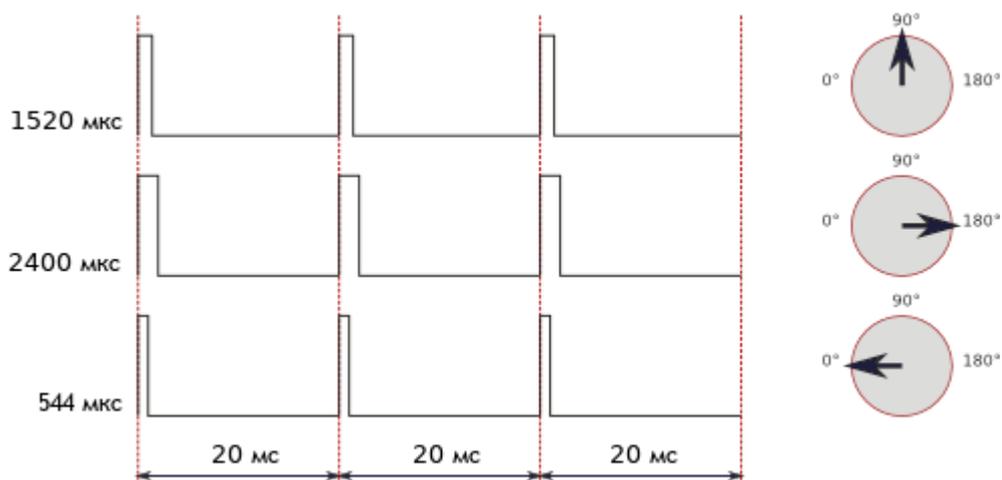


Рисунок 11. Импульс управляющего сигнала сервопривода

В каком положении вал сервопривода зависит от ширины импульса. Длительность этого сигнала определяется потенциометром. Это реализуется в одной части схемы. Вторая часть схемы сравнивает импульсы. При разной длительности импульсов включается электродвигатель. Направление вращения определяется тем, какой из импульсов короче. Если длины импульсов равны, электромотор останавливается.

Для передачи электроэнергии в аккумуляторную батарею необходимо использовать зарядное устройство. Из доступных вариантов можно выбрать плату TP4056. Она является полным линейным зарядным устройством постоянного тока или постоянного напряжения для литий-ионных батарей одноэлементного типа. Данная схема идеально подходит для портативных устройств. Также TP4056 работает в USB и в роли сетевого адаптера.

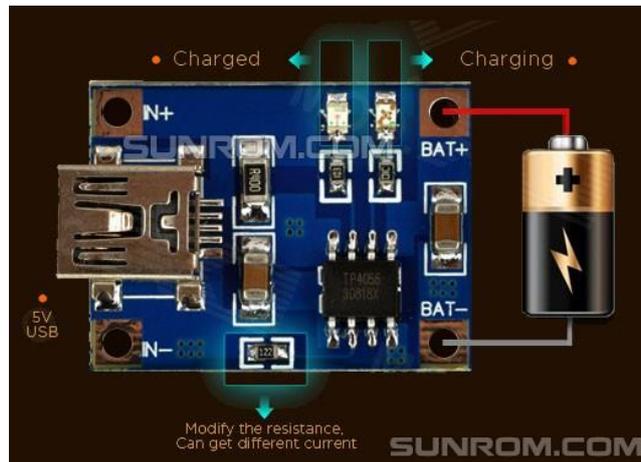


Рисунок 12. Схема TP4056

Напряжение заряда стабилизируется на уровне 4,2 В. Ток заряда же может за программироваться с помощью резистора. TP4056 способно автоматически завершать цикл зарядки, во время падения зарядного тока до 1/10 запрограммированного значения.

Потенциометр используется для смены режимов. Для системы будет выбран простейший переменный резистор. Принцип его работы в том, что на выводы элемента подается регулируемое напряжение. Потенциометр регулируется подвижным контактом, прикрепленным к ручке.

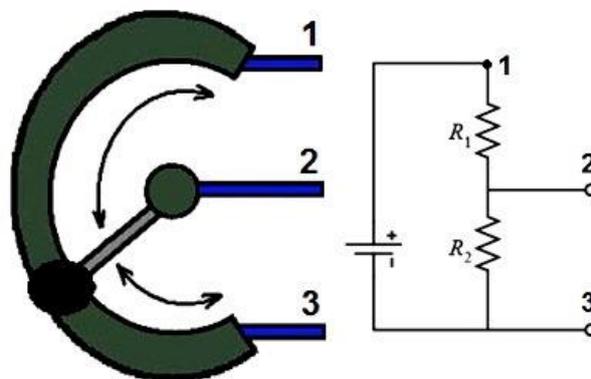


Рисунок 13. Схема потенциометра

Напряжение снимается от подвижного контакта, диапазоном от нуля до максимальной величины, которое равно входному напряжению на прибор.

Датчики света, они же фоторезисторы, размещаются на той же лицевой плоскости, что и солнечная панель.



Рисунок 14. Фоторезистор

Фоторезисторы подразделяют на две группы: с внешним и внутренним фотоэффектом. Производство фоторезисторов с внутренним фотоэффектом осуществляется с помощью нелегированных материалов, например, кремния или германия.

Падающие на устройство фотоны провоцируют электроны переходить в зону проводимости из валентной зоны. Из-за данного процесса в материале появляется огромное количество свободных электронов, это улучшает электропроводность и, как следствие, сопротивление уменьшается.

Самым важным элементом системы можно назвать солнечную панель. На неё стоит обратить особое внимание при выборе.

Существует четыре современных типа солнечных панелей: монокристаллические, поликристаллические, тонкопленочные и концентрированные.

Монокристаллические солнечные панели изготовлены из монокристаллического кремния. Их характерный внешний вид включает в себя темный цвет и закругленные края. Они очень эффективны благодаря чистоте кремния. Именно поэтому их эффективность может превышать 20%.

Монокристаллический кремний повышает их долговечность, даже когда дело касается высоких температур. У них также высокая выходная мощность. Однако это делает их дороже.



Рисунок 15. Монокристаллические солнечные панели

Поликристаллические солнечные панели также имеют характерный внешний вид: это квадратные панели с необрезанными углами, в основном синие. Их производство несколько быстрее и дешевле, потому что производятся они путем плавления сырого кремния.



Рисунок 16. Поликристаллическая солнечная панель

Они дешевле, но имеют чуть более низкий коэффициент эффективности, который составляет около 15 %. Они не так долговечны при длительном воздействии высоких температур.

Однако разница между ними и монокристаллическими панелями не столь существенна. Монокристаллические панели обладают немного большей пространственной эффективностью, но, когда речь идет о выходной мощности, они довольно похожи.

Тонкопленочные солнечные панели имеют тонкопленочные солнечные элементы и в основном используются для небольших солнечных энергетических систем.

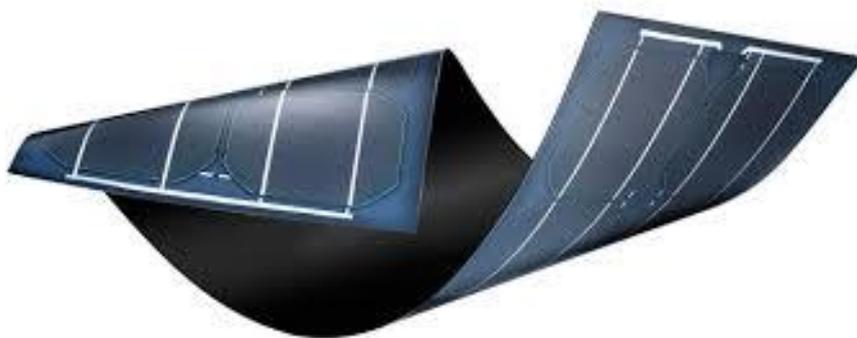


Рисунок 17. Тонкопленочная солнечная панель

Эти панели созданы на основании таких материалов, как кремний, кадмий или медь. Их легко производить, что делает их более дешевым вариантом, чем другие виды солнечных батарей, учитывая тот факт, что они требуют куда меньше материала для производства.

Помимо того, что подобные панели более доступны по цене, они также являются гибкими. Это значительно облегчает их применение и снижает их чувствительность к высоким температурам.

Для создания солнечных панелей из аморфного кремния используют трехслойную технологию, лучшую среди производства тонкопленочных материалов.

Учитывая, что они легко производятся и имеют низкую стоимость, срок их службы и гарантия меньше.

Концентрированные панели фотоэлементов являются многопереходными с эффективностью 41%. Они очень эффективны

благодаря своим изогнутым зеркальным поверхностям, линзам и системам охлаждения.



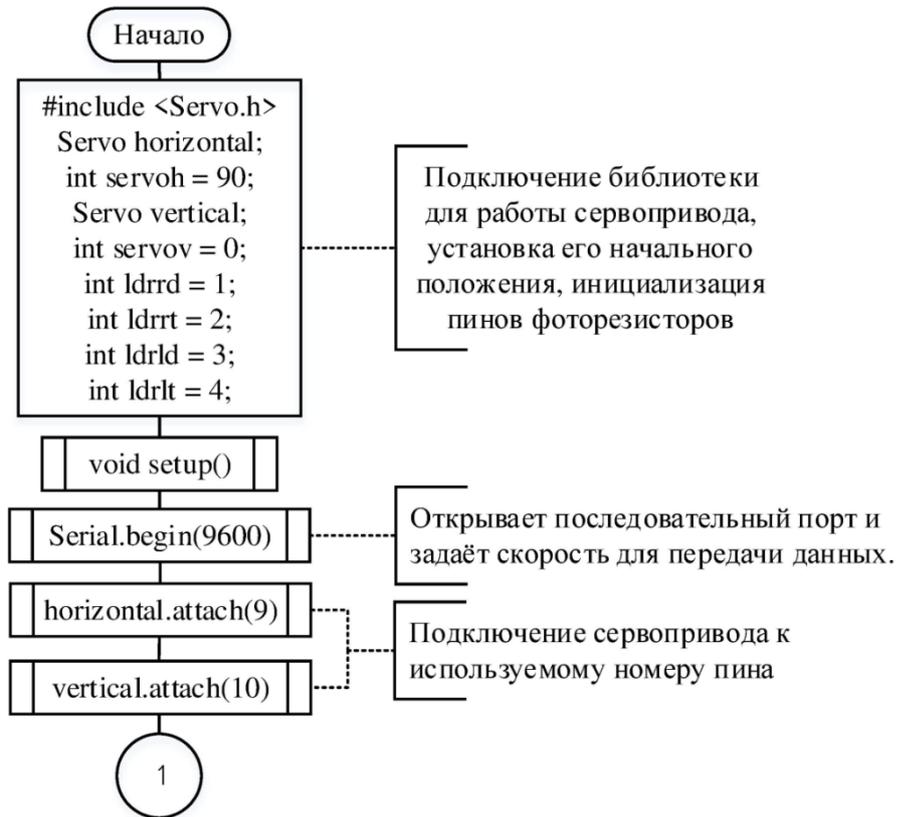
Рисунок 18. Концентрированная солнечная панель

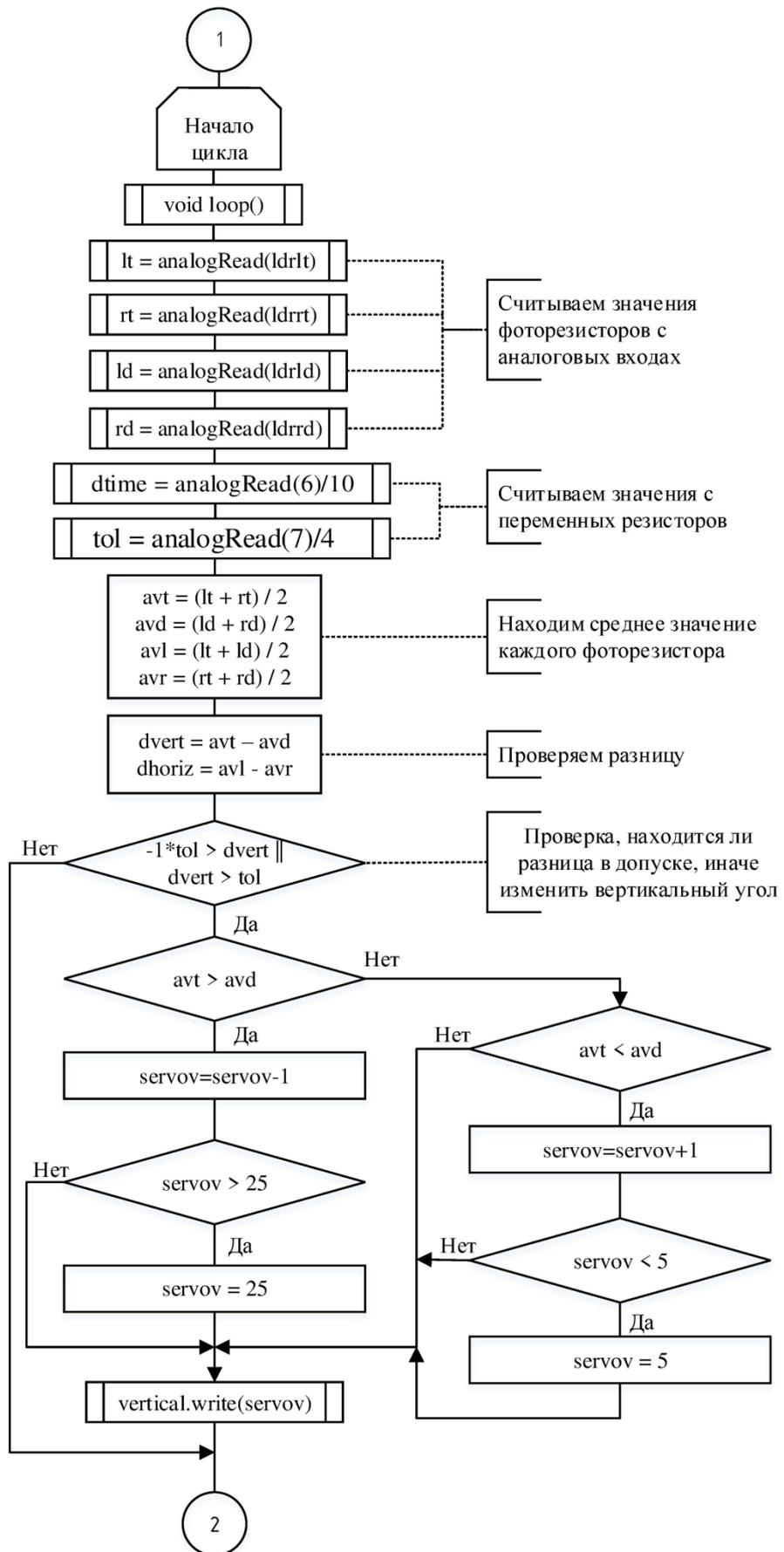
Так как данный вид панелей имеет высокий процент эффективности, он является наиболее оптимальным среди других видов солнечных панелей. Однако, чтобы достичь максимальной эффективности, необходимо, чтобы они располагались к солнцу под определенным углом. Для достижения этой цели внутри солнечной панели устанавливается солнечный трекер, следящий за солнцем.

Для создания солнечного трекера в данной работе не требуется получать высокие энергетические показатели, поэтому выбор можно остановить на самом популярном типе солнечных панелей, а именно поликристаллический.

### 3. Программная часть

Для программирования Arduino Mega, в начале необходимо описать алгоритм программы в упрощенном виде. На рисунке 19 представлена блок-схема программы управления солнечным трекером.





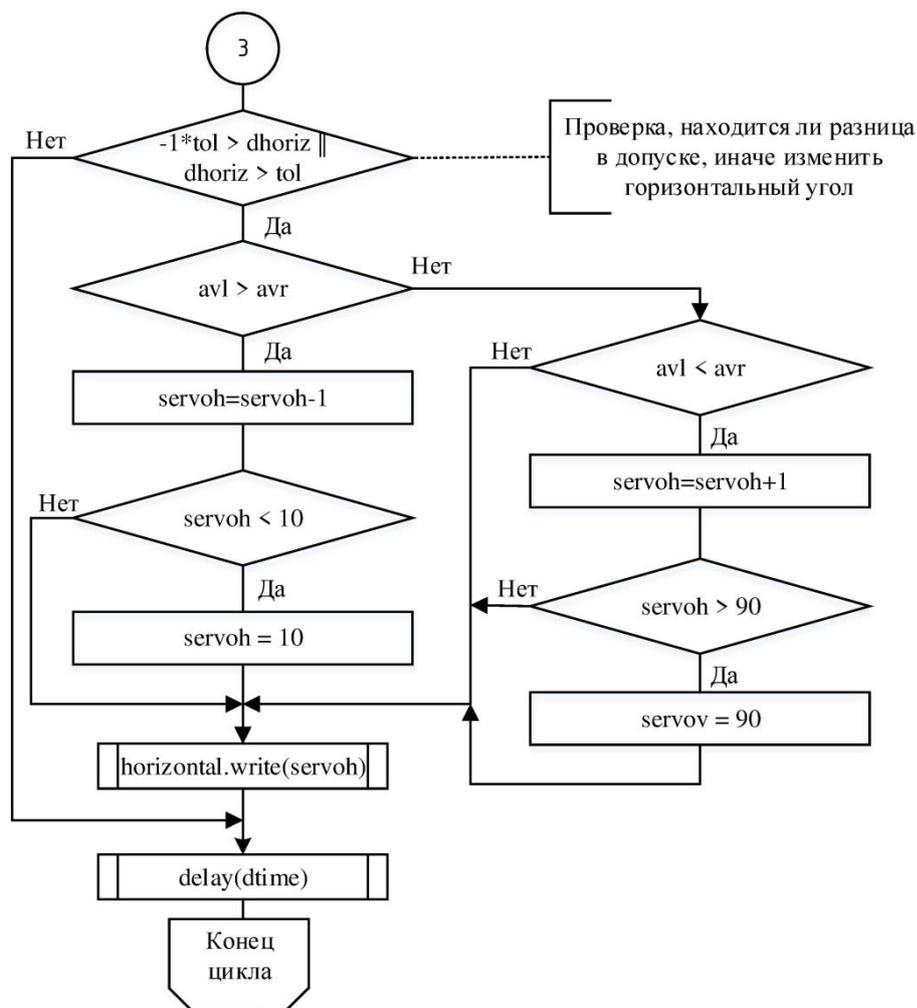


Рисунок 19. Блок-схема программы управления солнечным трекером

Для старта скетча используется `setup()`. После этой команды начинается инициализация переменных, а также определение режимов выводов. Возникает запуск библиотек и других условий.

Функция `loop()` зациклена, она позволяет программе вычислять и реагировать на полученные значения.

Команда `if..else` является контролем, позволяющим осуществлять несколько проверок в совокупности.

Функция `Serial` служит для связи с другими программными устройствами. Чтобы использовать команду `Serial` необходимо задействовать ввод/вывод 0 RX, 1 TX и USB порт. Однако если используется функция `Serial`, то нельзя подключать к портам 0 и 1 другие устройства.

Функция `analog` считывает значение аналогового входа. Обычно платформы Arduino имеют не менее шести каналов посредством аналого-цифрового преобразователя. Входное напряжение от 0 до 5 вольт считывается как значение от 0 до 1023.

Код для солнечного трекера в разделе «Приложение Б».

## 4. Экспериментальная часть

Экспериментальная часть диплома солнечного трекера состоит из создания макета, снятие вольт-амперных характеристик и анализа данных. Изготовление макета описано в разделе 4.1.

Габариты установки должны быть подобраны из расчета рационального использования площади солнечной панели. Площадка для солнечной панели должна быть достаточно легкой, чтобы сервоприводы справились с нагрузкой.

Все элементы системы должны быть расположены на корпусе солнечного трекера для его портативности.

Ниже приведена примерная конструкторская схема солнечного трекера.

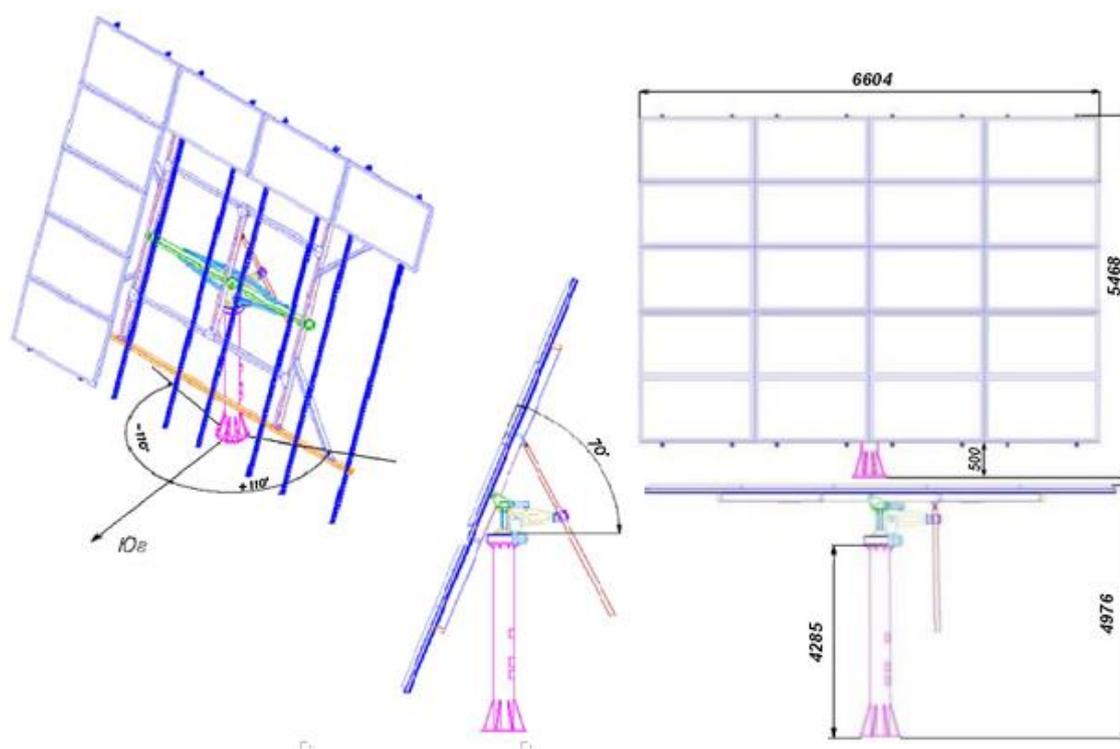


Рисунок 20. Габариты двухосевой солнечной панели

Солнечная система, изображенная на рисунке 20, способна вырабатывать до 5 кВт энергии, однако ее размеры слишком большие для демонстрации системы управления в данной ВКР, поэтому габариты установки будут сокращены на порядок.

#### 4.1. Изготовление макета установки

Конструктивно установка состоит из подставки, подвижных кронштейнов и площадки, на которой располагаются солнечные панели.

Габариты необходимо сопоставлять с размерами солнечной панели. Для устойчивости установки подставка должна иметь больший вес по сравнению с подвижной частью. Ниже изображена модель установки в Компас 3D.

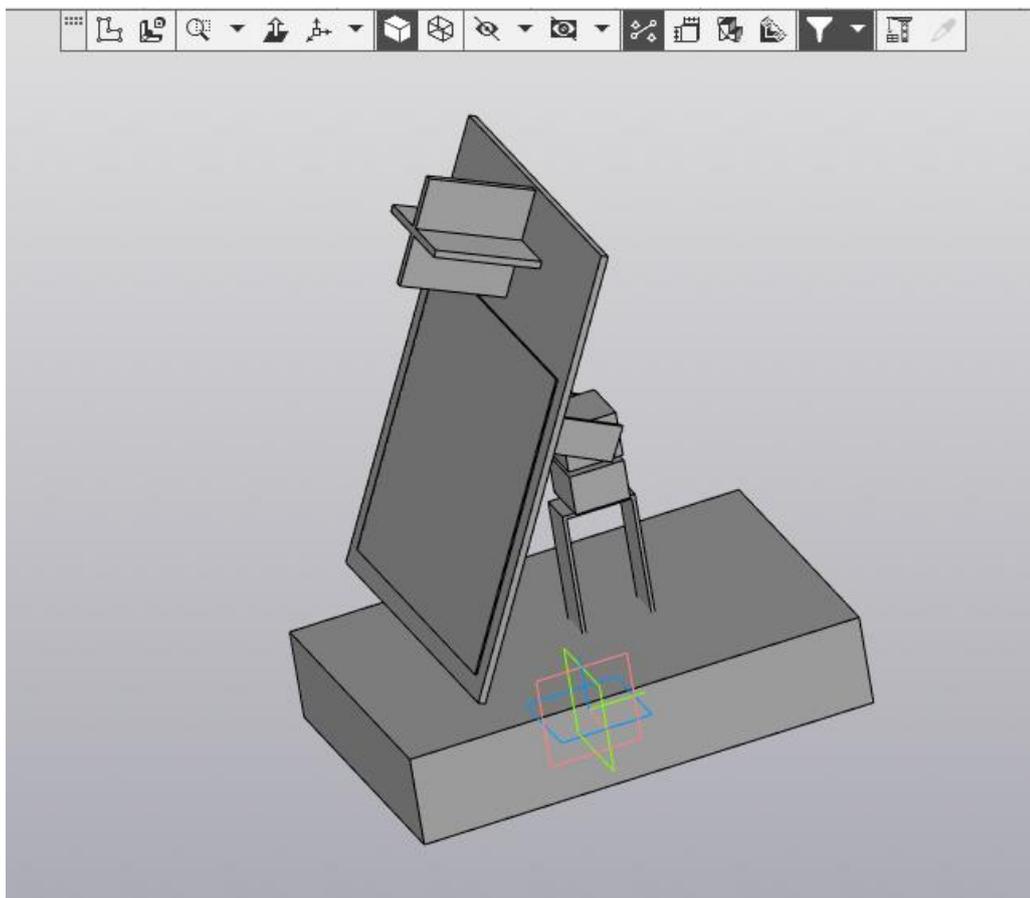


Рисунок 21. Модель системы в 3D

Корпус установки – это совокупность сборных деталей из плотного материала. Был выбран стеклотекстолит толщиной 4 мм для площадки, на которую крепится солнечная панель, и деревянная доска для подставки. Габариты частей корпуса были перенесены по образцу чертежа на рисунке 22.

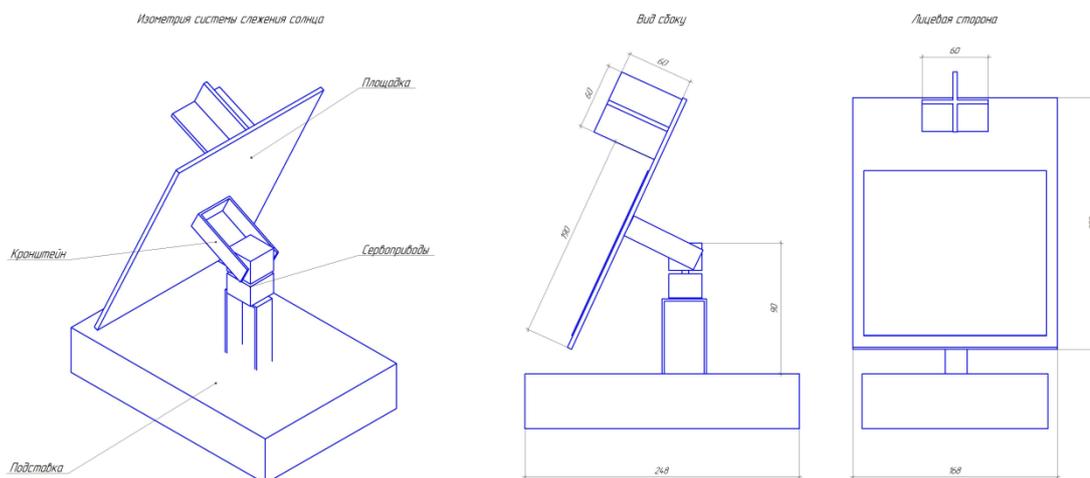


Рисунок 22. Габариты корпуса установки

Для скрепления частей корпуса используются болты и стальной уголок. Ручки потенциометра выведены на поверхность подставки. Также на поверхность выведена кнопка сброса.

Вес всей установки составляет около 1 кг, однако подвижную площадку, сделанную из стеклотекстолита, заменили на пластмассовый аналог.

Контроллер, аккумулятор и провода должны быть спрятаны в подставке как на рисунке 23.

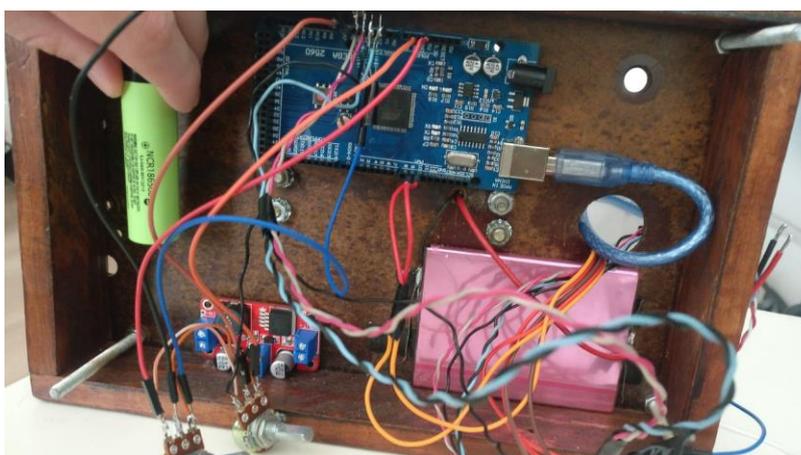


Рисунок 23. Подставка установки

Подвижный узел установки состоит из сервоприводов и специальных кронштейнов, заказанных с сайта Aliexpress.



Рисунок 24. Кронштейн для сервоприводов.

Двухосевой солнечный трекер способен вращаться на  $180^\circ$ , но соединительные провода останутся целыми, так как поворот площадки ограничивается программно. Ниже изображено, как кронштейн соединен с сервоприводами.



Рисунок 25. Кронштейн и сервоприводы.

Провода для фоторезисторов соединяются с платой через спайку. Для целостности изоляции жилы проводов сформирован в единый жгут.

Светодиоды разделены стенкой из текстолита для уменьшения помех аналогового сигнала. Солнечная панель была приклеена на текстолитовую площадку.

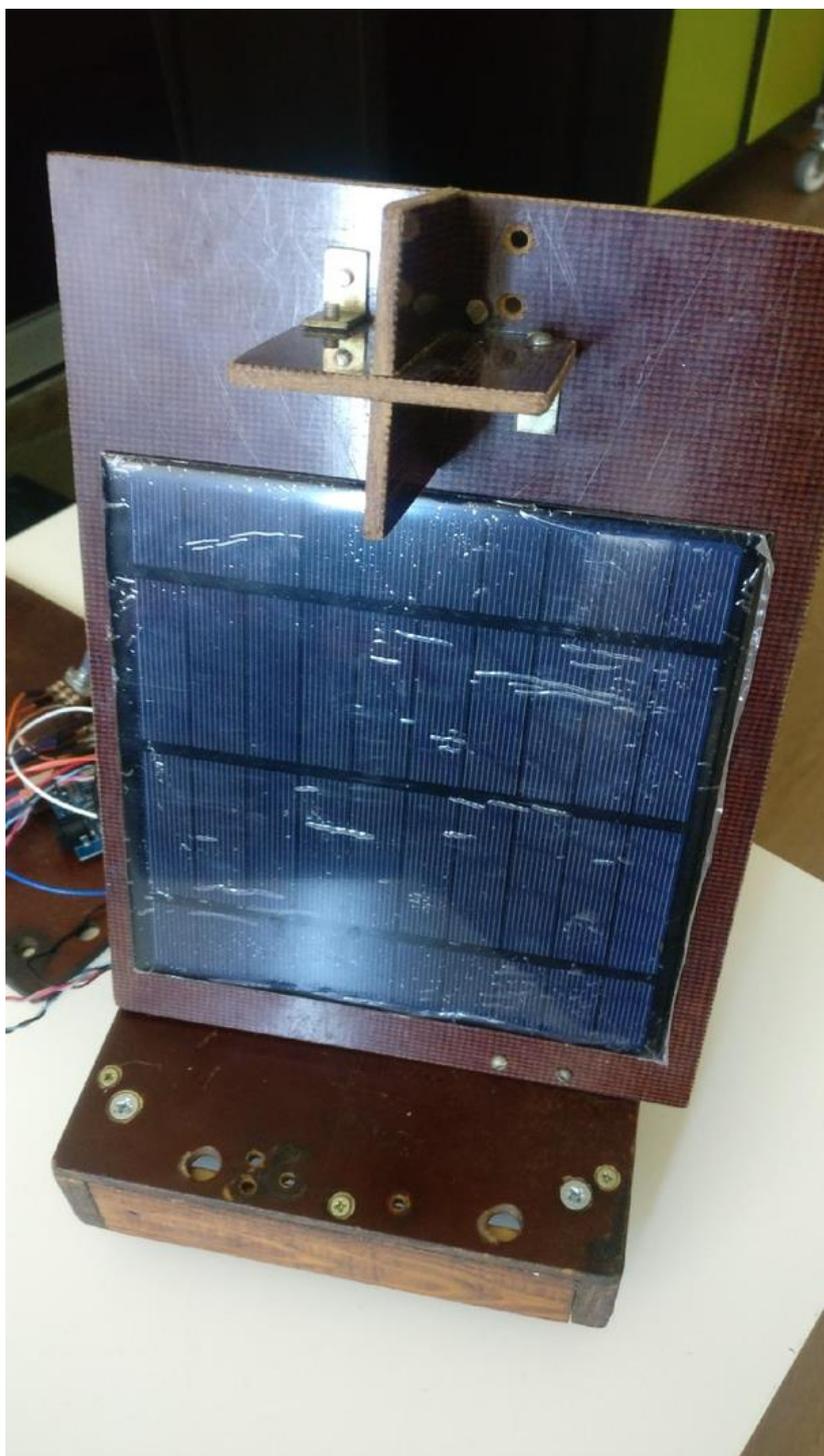


Рисунок 26. Лицевая сторона установки.

## 4.2. Отладка макета

После формирования корпуса макета, а также соединения всех элементов схемы, установка была запущена в работу. В процессе отладки макета возникли сложности с корректным вращением платформы. Чувствительность светодиодов была слишком высока, поэтому платформа дергалась.

Чувствительность светодиодов регулируется потенциометром R6 в электрической схеме, которому присвоено значение 131, если посмотреть в монитор последовательного порта.

Следующая проблема, появившаяся при отладке системы – недостаток напряжения на сервоприводах. Данная проблема решилась сама собой после отключения и подключения жгутов питания.

После отладки системы все узлы и коммутация была проверена на прочность в работе в течении часа.

## 4.3. Экспериментальное исследование

Система слежения солнечным трекером способна вырабатывать заявленные производителем солнечной панели 5 вольт. Однако эксперимент на открытом солнце показал ток в 650 мА, что является лишь 65% от заявленных характеристик.



Рисунок 27. Снятие характеристик с установки

Замеры были произведены на набережной комсомольского района Тольятти. Эксперимент проводился в один день с 12:00 до 20:00 часов по местному времени. Устройство было расположено перпендикулярно к солнцу, первым делом измерял ток и напряжение двухосевого солнечного трекера, после чего тоже самое проделал с неподвижной панели, все показания снимал с помощью электроизмерительного прибора, мультиметра.

Итог показаний был сведен в таблицу и выведен на график. Направление солнечной панели изначально должно быть одинаковым перпендикулярно лучам солнца.

Таблица 1. Временная характеристика солнечного трекера

	Трекер	Панель		Трекер	Панель
Время	I, А	I, А	U, В	P, Вт	P, Вт
12:00	0,76	0,64	5,6	4,256	3,584
13:00	0,8	0,55	5,7	4,56	3,135
14:00	0,74	0,72	5,7	4,218	4,104
15:00	0,9	0,75	5,7	5,13	4,275
16:00	0,68	0,59	5,7	3,876	3,363
17:00	0,7	0,66	5,7	3,99	3,762
18:00	0,56	0,55	5,7	3,192	3,135
19:00	0,5	0,47	5,7	2,85	2,679
20:00	0,33	0,15	5,7	1,881	0,855

Как видно в таблице, были сняты показания тока и напряжения в конкретный момент времени. Панель была установлена в полдень поверхностью к солнцу. Температура воздуха днем достигала 25 градусов, что соответствует летней погоде. На небе была переменная облачность, однако удалось произвести замеры в абсолютно безоблачную погоду в районе трех часов дня.



Рисунок 28. Погодные условия

Погодные условия позволили выработать солнечной панели максимальное напряжение и ток до 0.9 А.

Солнечный трекер перемещал солнечную панель в соответствии с траекторией солнца. Неподвижная панель была расположена перпендикулярно к солнцу, что видно по показанию в таблице.

Ниже представлен график мощности с течением времени. Он наглядно показывает разницу КПД использования солнечного трекера и КПД неподвижной панели в момент выработки электричества.

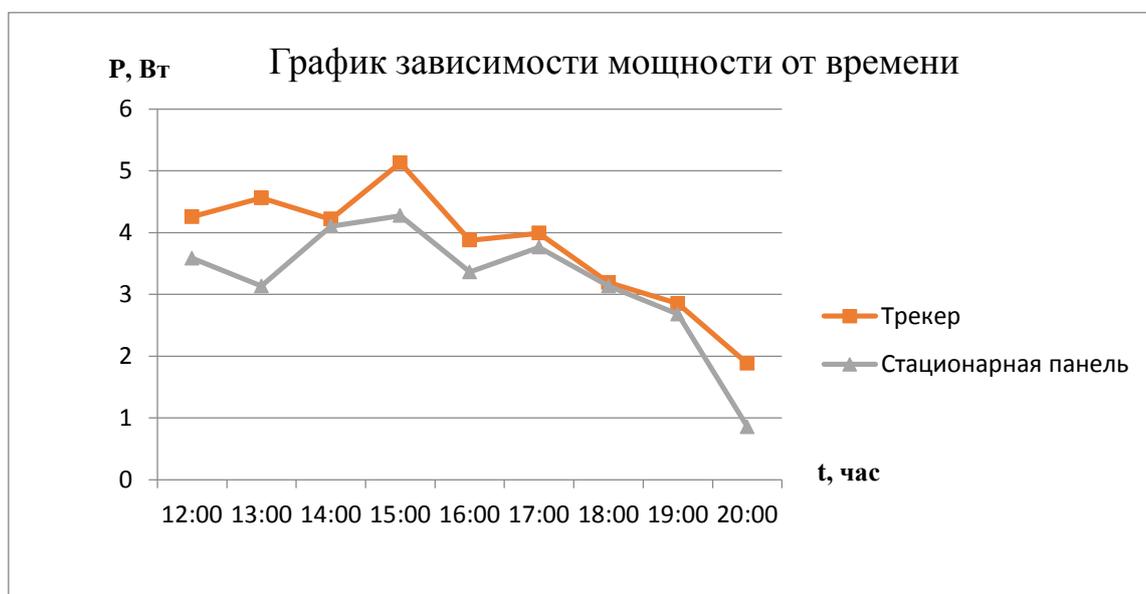


Рисунок 29. Диаграмма мощности

Расчет показал, что эффективность панели с солнечным трекером выше неподвижной примерно на 18%, однако этого достаточно, чтобы убедиться в рациональности использования данной технологии.

В данном эксперименте так же был произведён расчет КПД солнечной панели, который представлен ниже.

Для того чтобы рассчитать КПД солнечной панели, нужно сравнить мощность излучения, падающего на панель от источника света (затраченная мощность) и выдаваемую мощность солнечной панели (полезная мощность), а также определить площадь солнечной панели.

Для определения величины солнечной инсоляции (количество облучения поверхности пучком солнечных лучей), воспользовался данными по Самарской области, которые приведены в таблице 2.

Таблица 2. Солнечная инсоляция по Самарской области

	Солнечная инсоляция, кВт*ч/м <sup>2</sup>	Оптимальный угол наклона, °
Январь	1,76	69
Февраль	2,78	61
Март	4,15	49
Апрель	5,04	33
Май	5,95	19
Июнь	6,26	13
Июль	6,11	16
Август	5,13	28
Сентябрь	3,90	43
Октябрь	2,66	56
Ноябрь	1,85	66
Декабрь	1,58	72
<b>Среднее за год</b>	<b>3,94</b>	<b>43,6</b>

По таблице 2 видно, что в июне месяце уровень солнечной инсоляции достигает  $6,26 \frac{\text{кВт}\cdot\text{ч}}{\text{м}^2}$ , исходя из этого, можно сделать вывод, что в среднем вырабатывается  $1 \frac{\text{кВт}\cdot\text{ч}}{\text{м}^2}$  количества энергии солнца. Теперь нужно рассчитать площадь солнечной панели, для того чтобы определить затрачиваемую мощность. Площадь определим по формуле 1.

$$S = a \times b = 0,16 \times 0,16 = 0,026 \text{ м}^2 \quad (1)$$

где  $a = b = 0,16$  м - размеры сторон солнечной панели.

Затрачиваемая мощность находится по формуле 2.

$$P_{\text{зат}} = P_c \times S = 1000 \times 0,026 = 25,6 \text{ Вт}, \quad (2)$$

где  $P_c = 1000 \frac{\text{Вт}\cdot\text{ч}}{\text{м}^2}$  - мощность солнца;

$S, \text{ м}^2$  - площадь солнечной панели.

Полезную мощность определяем по формуле 3.

$$P_{\text{пол}} = U \times I = 5,67 \times 0,65 = 3,69 \text{ Вт}, \quad (3)$$

где  $U, \text{ В}$  - напряжение с повышающего модуля;

$I, \text{ А}$  - ток солнечной панели.

КПД солнечной панели находим по формуле 4.

$$\eta = \frac{P_{\text{пол}}}{P_{\text{зат}}} \cdot 100\% = \frac{3,69}{25,6} \cdot 100\% = 14,4\%, \quad (4)$$

где  $P_{\text{пол}}, \text{ Вт}$  - полная мощность;

$P_{\text{зат}}, \text{ Вт}$  - затрачиваемая мощность.

Средняя мощность трекера составляет  $P_{\text{ср.трекер}} = 3,773 \text{ Вт}$ , а средняя мощность неподвижной панели  $P_{\text{ср.панель}} = 3,21 \text{ Вт}$ . Исходя из этих данных, определим эффективность трекера с помощью математической пропорции.

$$P_{\text{ср.трекер}} - \eta$$

$$P_{\text{ср.панель}} - x$$

Подставим в переменные соотношения числовые значения.

$$3,773 - 14,4\%$$

$$3,21 - x$$

Из составленного соотношения находим  $x$ , т.е. эффективность трекера (формула 5)

$$x = \frac{3,21 \cdot 14,4}{3,773} = 12,25\% \quad (5)$$

Трекер эффективнее неподвижной панели на 2,15%, относительно на 18%

## Заключение

В результате выполнения выпускной квалификационной работы был разработан прототип двухосевого солнечного трекера, была рассмотрена основная идея применения солнечных трекеров, а также немалое количество разновидностей систем управления позиционирования.

В данной работе были выполнены все поставленные задачи и цели, проведено экспериментальное исследование с применением двухосевого солнечного трекера. Были сняты временные характеристики подвижной и неподвижной солнечной панели, проведен сравнительный анализ, а также произведен расчет КПД солнечной панели.

В целом, результаты, представленные в этой работе, подтверждают, что двухосная система слежения более эффективна по сравнению с неподвижными системами с точки зрения эффективности.

В последние годы инновационные разработки в системах слежения солнца позволили разработать множество солнечных, тепловых и фотоэлектрических систем для разнообразного применения по сравнению с традиционными неподвижными панелями. Солнечные системы, которые отслеживают изменение траектории движения солнца в течение дня, собирают гораздо большее количество солнечной энергии, и, следовательно, генерируют значительно более высокую выходную мощность, поэтому самый простой способ получить больше энергии из солнечной панели – это заставить ее отслеживать солнце.

Настоящая работа может быть полезна для улучшения проектных характеристик различных типов солнечных систем слежения для повышения производительности.

## Список используемой литературы

1. Потенциометр [Электронный ресурс]. URL: <https://wiki.iarduino.ru/page/potenciometr/> (дата обращения: 07.05.2020)
2. Lithium Battery Charger [Электронный ресурс]. URL: <https://www.sunrom.com/p/lithium-battery-charger-tp4056-1a> (дата обращения: 07.05.2020)
3. How Servo Motor Works & Interface It With Arduino [Электронный ресурс]. URL: <https://lastminuteengineers.com/servo-motor-arduino-tutorial/> (дата обращения: 07.05.2020)
4. Arduino Based Sun Tracking Solar Panel [Электронный ресурс]. URL: <https://circuitdigest.com/microcontroller-projects/arduino-solar-panel-tracker> (дата обращения: 07.05.2020)
5. All Electronics Trading Company [Электронный ресурс]. URL: [https://a.aliexpress.ru/\\_eKfUPZ](https://a.aliexpress.ru/_eKfUPZ) (дата обращения: 07.05.2020)
6. Most Common Types of Solar Panels Explained [Электронный ресурс]. URL: <https://customenergy.com/4-most-popular-types-of-solar-panels-explained/> (дата обращения: 07.05.2020)
7. Солнечные трекары [Электронный ресурс]. URL: <https://msk.manblan.ru/catalog/alternativeenergy/solar-trackers/> (дата обращения: 07.05.2020)
8. Солнечный трекер [Электронный ресурс]. URL: <https://alter220.ru/solnce/treker.html> (дата обращения: 07.05.2020)
9. Солнечный трекер [Электронный ресурс]. URL: <https://radiolaba.ru/microcotrollers/solnechniy-treker.html> (дата обращения: 07.05.2020)
10. Статистика солнечной инсоляции по Самарской области [Электронный ресурс]. URL: <https://www.betaenergy.ru/insolation/samara/> (дата обращения: 07.05.2020)

11. Самонаводящаяся солнечная панель [Электронный ресурс]. URL: <https://sxem.org/2-vse-stati/17-avtomatika-v-bytu/212-solartracker> (дата обращения: 07.05.2020)
12. Двухосевой солнечный трекер на Arduino [Электронный ресурс]. URL: <https://habr.com/ru/post/357900/> (дата обращения: 07.05.2020)
13. Solar tracking performance and economics [Электронный ресурс]. URL: <http://www.solarchoice.net.au/blog/solar-trackers/> (дата обращения: 07.05.2020)
14. Солнечная автономия в глубинке [Электронный ресурс]. URL: <https://alternativenergy.ru/solnechnaya-energetika/888-kak-poluchat-bolshe-energii-solntsa-solnechnyy-treker-solnechnyy-kontroller.html> (дата обращения: 07.05.2020)
15. Уделл С. Солнечная энергия и другие альтернативные источники энергии. М.:Знание, 1980.-88 с. (дата обращения: 07.05.2020)
16. Немков Д.А., Немихин Ю.Е., Матвеев А.В., Одинаев И.Н. Разработка и создание системы слежения за положением солнца (дата обращения: 07.05.2020)
17. Поворот солнечных батарей [Электронный ресурс]. URL: <http://ep-z.ru/sample-page/tehnika/saes/povorot-solnechnyih-batarey> (дата обращения: 07.05.2020)
18. Лучшие радиолюбительские схемы [Электронный ресурс]. URL: <https://bestschemes.ru/tag/arduino/> (дата обращения: 07.05.2020)
19. Солнечные трекеры [Электронный ресурс]. URL: <http://ust.su/solar/media/section-inner79/3032/> (дата обращения: 07.05.2020)
20. Система слежения за солнцем ST1500 [Электронный ресурс]. URL: <http://greenchip.com.ua/26-0-196-0.html> (дата обращения: 07.05.2020)

Приложение А  
Перечень элементов

Поз.	Наименование	Кол.	Примечан ие					
	Микроконтроллерная плата							
DD3	Arduino MEGA 2560	1						
	Модули							
DD2	Модуль зарядного устройства TP4056	1						
DD4	Повышающий модуль питания DC-DC	1						
SB1	Кнопка	1						
	Сервоприводы							
DD5-DD6	Сервопривод MG996R	2						
	Резисторы							
BL1-BL4	Фоторезистор	4						
R5,R6	Переменный резистор 10 кОм	2						
R1-R4	Постоянный резистор 1 кОм	4						
	Фотоэлементы							
DD1	Солнечная панель 4,5 Вт	1						
	Устройство хранения энергии							
G1	АКБ емкостью 2700 мАч на 3,7 В	1						
20-110304.113/09.319.04								
Изм.	Лист	№ докум.	Под п.	Дата				
Разраб.		Шафииков И.Р.			Перечень элементов	Лит.	Лист	Листов
Пров.		Прядилов А.В.					1	1
Н.контр.						ТГУ гр. ЭЛБ-		

## Приложение Б

## Программный код

```
#include <Servo.h> // Подключаем библиотеку сервоприводов
Servo horizontal; // Горизонтальный сервопривод
int servoh = 90; // Начальное положение 90 градусов

Servo vertical; // Вертикальный сервопривод
int servov = 0; // Начальное положение 0 градусов

// LDR pin (объявляем пины фоторезисторов)
// name = analogpin;
int ldrrd = 1; //LDR нижний правый
int ldrrt = 2; //LDR верхний правый
int ldrlr = 3; //LDR нижний левый
int ldrlt = 4; //LDR верхний левый

/*int ldrlt = 4; //LDR верхний левый
int ldrlr = 3; //LDR нижний левый
int ldrrt = 2; //LDR верхний правый
int ldrrd = 1; //LDR нижний правый
*/

void setup()
{
  Serial.begin(9600);
  // servo connections
  // name.attach(pin);
  horizontal.attach(9);
```

```
vertical.attach(10);
```

Продолжение приложения Б

```
}
```

```
void loop()
```

```
{
```

```
int lt = analogRead(ldr1t); // верхний левый
```

```
int rt = analogRead(ldr1r); // верхний правый
```

```
int ld = analogRead(ldr2l); // нижний левый
```

```
int rd = analogRead(ldr2r); // нижний правый
```

```
int dtime = analogRead(6)/10; // считываем значения с переменных  
резисторов
```

```
int tol = analogRead(7)/4;
```

```
int avt = (lt + rt) / 2; // Среднее значение верхнего
```

```
int avd = (ld + rd) / 2; // Среднее значение нижнего
```

```
int avl = (lt + ld) / 2; // Среднее значение левого
```

```
int avr = (rt + rd) / 2; // Среднее значение правого
```

```
int dvert = avt - avd; // Проверить разницу верхнего и нижнего
```

```
int dhoriz = avl - avr; // Проверить разницу левого и правого
```

```
// данные с датчиков
```

```
/* Serial.println(lt);
```

```
Serial.println(rt);
```

```
Serial.println(ld);
```

```
Serial.println(rt);
```

```
Serial.println(dtime); // 1-й потенциометр
```

```
Serial.println(tol); // 2-й потенциометр
```

```
Продолжение приложения Б
```

```
*/
```

```
if (-1*tol > dvert || dvert > tol) // Проверка, находится ли разница в допуске, иначе изменить вертикальный угол
```

```
{  
  if (avt > avd)  
  {  
    servov = --servov;  
    if (servov > 25)  
    {  
      servov = 25;  
    }  
  }  
  else if (avt < avd)  
  {  
    servov = ++servov;  
    if (servov < 5)  
    {  
      servov = 5;  
    }  
  }  
  vertical.write(servov);  
}
```

```
if (-1*tol > dhoriz || dhoriz > tol) // Проверка, находится ли разница в допуске, иначе изменить горизонтальный угол
```

```
{
```

## Продолжение приложения Б

```
if (avl > avr)
{
    servoh = --servoh;
    if (servoh < 10)
    {
        servoh = 10;
    }
}
else if (avl < avr)
{
    servoh = ++servoh;
    if (servoh > 90)
    {
        servoh = 90;
    }
}
else if (avl = avr)
{
    // nothing
}
horizontal.write(servoh);
}
delay(dtime);
}
```