



## Аннотация

Объем 57 с., 19 рис., 4 табл., 20 источников, 2 прил.

### СОЛНЕЧНАЯ ЭНЕРГЕТИКА, СОЛНЕЧНЫЙ ТРЕКЕР

Объектом исследования является макет одноосевого солнечного трекера.

Цель работы: изготовление действующего макета одноосевого солнечного трекера.

Задачи работы:

1. Обзор существующих решений;
2. Разработка электрической принципиальной схемы;
3. Выбор элементов схемы;
4. Разработка программы, управляющей логикой работы;
5. Изготовление макета устройства;
6. Отладка макета;
7. Экспериментальные исследования.

Работа состоит из пяти глав, в которых решены упомянутые задачи.

Для разработки программы, управляющей логикой работы, использовалась среда разработки Arduino. Анализ экспериментальных исследований проводился с использованием пакета MathCad 15.

Степень внедрения: создан действующий макет одноосевого солнечного трекера.

Областью применения данной работы является направление альтернативной энергетики – гелиоэнергетика.

Созданный макет может быть использован в качестве демонстрационного пособия при обучении студентов и профагитационных мероприятий со школьниками, а также для агитации абитуриентов к поступлению на кафедру «Промышленная электроника» ТГУ.

## Содержание

Аннотация .....	2
Содержание.....	4
Введение.....	5
1. Обзорная часть .....	8
1.1. Формулирование актуальности, цели и задач работы .....	8
1.2. Обзор существующих решений.....	9
1.2.1. Применение солнечных трекеров .....	9
1.2.2. Основная концепция.....	9
1.2.3. Состав солнечного трекера .....	12
1.2.4. Классификация трекеров.....	15
1.2.5. Способы управления системой ориентации трекера .....	21
2. Схемотехническая часть .....	23
3. Разработка конструкции.....	28
4. Программная часть .....	30
5. Исследовательская часть.....	36
5.1. Снятие вольт-амперной характеристики солнечной батареи .....	36
5.2. Проведение основного эксперимента .....	40
Заключение .....	45
Список используемой литературы .....	47
Приложение А .....	49
Приложение Б.....	53

## Введение

С развитием цивилизации человечество нуждалось в дополнительной энергии. Причём чем дальше, тем больше. В настоящее время люди стремятся осваивать всё новые источники энергии. Одним из таких источников является альтернативная энергетика.<sup>[1]</sup>

С течением времени изменялось определение и характер данного вида энергии, а споры в связи с его использованием не утихают до сих пор.

В общем смысле, альтернативная энергия, как в настоящее время она задумана, это то, что вырабатывается без вредных последствий, присущих использованию ископаемого топлива. В частности, высоким уровнем выбросов диоксида углерода (парниковых газов), что является важным фактором глобального потепления.<sup>[2]</sup>

Одним из направлений в альтернативной энергетике является гелиоэнергетика.

В данный момент постоянно развиваются технологии, которые используют солнечный свет и его тепло. К таким технологиям относятся выработка фотоэлектричества и использование солнечной тепловой энергии.

Гелиоэнергетика является важным источником возобновляемой солнечной энергии, которую можно использовать активным или пассивным способом. С одной стороны, применяя активный способ использования данного вида энергии, мы можем вырабатывать электричество в фотоэлектрических системах или использовать её для нагрева воды. С другой стороны, использовать данный вид энергии при строительстве зданий, акцентируя своё внимание на выборе материалов, имеющих полезную для нас теплоёмкость или обладающих необходимыми дисперсионными свойствами. Также можно ориентировать здание к Солнцу и использовать это при проектировании площадей, когда мы хотим добиться естественной циркуляции воздуха или нужной освещенности помещения.<sup>[3]</sup>

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

Фотоэлектричеством называется метод преобразования солнечной энергии в электричество постоянного тока с использованием полупроводниковых материалов, которые проявляют фотоэлектрический эффект, явление обычно изучается в области физики, фотохимии и электрохимии. Данный эффект объясняется воздействием фотонов (частиц света), обладающих необходимой энергией (длиной волны), на электроны полупроводникового вещества (обычно, кремния), в результате чего происходит их «вырывание» и испускание, что приводит к возникновению фототока (или электрического тока). В частности, это называется внешним фотоэффектом.<sup>[4]</sup>

Для того чтобы повысить мощность установки, использующей явление внешнего фотоэффекта, пластины кремния (солнечные элементы), как правило, объединяют в модули, называемые солнечными батареями.

Солнечные батареи вырабатывают электрический ток под воздействием солнечного света. Электроэнергия в свою очередь может быть направлена на питание оборудования или для подзарядки аккумулятора. Первым практическим применением солнечных батарей было питание орбитальных спутников и других космических аппаратов, а на сегодняшний день большинство фотоэлектрических модулей используется для выработки электроэнергии в быту и для промышленных предприятий.

Материалы, используемые в настоящее время для фотовольтаики, включают монокристаллический кремний, поликристаллический кремний, аморфный кремний. Помимо кремниевых используются разновидности арсенид-галлиевых, органических и многослойные типы батарей.<sup>[5]</sup>

Существуют некоторые приёмы, которые могут помочь увеличить производительность солнечных батарей и получить больше солнечной

энергии. Первый приём – это отслеживать точку максимальной мощности, а второй – отслеживать положение Солнца.

Отслеживание точки максимальной мощности (ОТММ, англ. maximum power point tracking, MPPT) осуществляется с помощью специальных контроллеров ОТММ, которые встраиваются в большинство современных солнечных инверторов. Суть этого метода заключается в том, что контроллер анализирует вольт-амперную характеристику (ВАХ) солнечной батареи для нахождения оптимального режима работы, при котором при данной освещенности будет генерироваться максимальное количество энергии.<sup>[6]</sup>

Следить за положением Солнца позволяют солнечные трекеры, о которых и будет идти речь в данной работе.<sup>[7]</sup>

Выработка энергии благодаря использованию солнечного трекера увеличивается, поскольку увеличивается количество солнечной энергии, попадающей на модуль.

В рамках данной работы предполагается разработать, создать и отладить небольшую действующую модель одноосевого солнечного трекера. Такая модель может быть использована в качестве демонстрационного пособия на выставках и при агитации абитуриентов, а также позволит провести ряд экспериментов, таких как:

1. Сравнение энергетической выработки между стационарной установкой солнечных батарей и использованием трекера;

2. Сравнение энергетической выработки при использовании вертикальной оси вращения и наклонной.

# 1. Обзорная часть

## 1.1. Формулирование актуальности, цели и задач работы

Гелиоэнергетика, как одно из направлений альтернативной энергетики, начинает занимать всё больше места в исследованиях проводимых научными институтами и промышленными организациями. Разрабатываются всё новые способы увеличения производимой энергии за счёт Солнца.<sup>[8]</sup>

Солнечный трекер является устройством, которое ориентирует полезную нагрузку перпендикулярно к Солнцу. Нагрузкой, как правило, являются солнечные батареи, отражатели Френеля, зеркала или линзы.

В фотоэлектрических системах, трекеры используются для минимизации угла падения между входящим солнечным светом и нормалью фотоэлектрической панели. Использование солнечного трекера увеличивает количество энергии генерируемой солнечными батареями. Исходя из вышесказанного, разработка и улучшение данных устройств является актуальной задачей.

**Целью** данной работы является: изготовление действующего макета одноосевого солнечного трекера.

Для достижения этой цели поставлены и выполнены следующие **задачи**:

1. Обзор существующих решений;
2. Разработка электрической принципиальной схемы;
3. Выбор элементов схемы;
4. Разработка программы, управляющей логикой работы;
5. Изготовление макета установки;
6. Отладка макета;
7. Экспериментальные исследования.

## **1.2. Обзор существующих решений**

### **1.2.1. Применение солнечных трекеров**

В 2008-2009 годах было предсказано, что трекеры будут использоваться, по крайней мере, в 85% коммерческих установок мощностью более одного мегаватта в периоды с 2009 по 2012 г. Однако, по состоянию на апрель 2014 года, не существует каких-либо данных, подтверждающих эти прогнозы.

В фотоэлектрических концентраторных модулях (CPV) и концентраторах солнечной энергии (CSP), трекеры используются для задействования оптических компонентов в CPV и CSP системах. Оптика этих концентрированных солнечных устройств принимает на себя прямое солнечное излучение и, следовательно, должна быть ориентирована надлежащим образом, чтобы собирать энергию. Системы слежения можно найти для всех данных концентраторов, а также для обыкновенных солнечных батарей, поскольку такие системы не производят энергию, если не направлены на Солнце. <sup>[9][10]</sup>

### **1.2.2. Основная концепция**

Эффективная площадь плоской фотоэлектрической панели изменяется в зависимости от угла между панелью и Солнцем.

Солнечный свет состоит из двух составляющих: прямого света солнечных лучей и рассеянного света. Прямой солнечный свет несет около 90% солнечной энергии, а рассеянный несет остаток. Рассеянный свет преобладает в пасмурные дни, когда небо затянуто облаками. Поскольку большая часть энергии находится в прямом луче, необходимо как можно дольше удерживать фотоэлектрическую панель, направленной на Солнце.



Энерговклад прямого луча уменьшается с увеличением угла между светом и нормалью панели. Но стоит понимать, что трекары, которые имеют точность  $\pm 5^\circ$ , могут поставлять более чем 99.6% от энергии, отдаваемой прямым лучом плюс 100% от рассеянного света. Как результат, отслеживание с высокой точностью обычно не используется в неконцентрируемых панелях.<sup>[11]</sup>

Траекторию движения Солнца в течение года можно увидеть на рисунке 1.

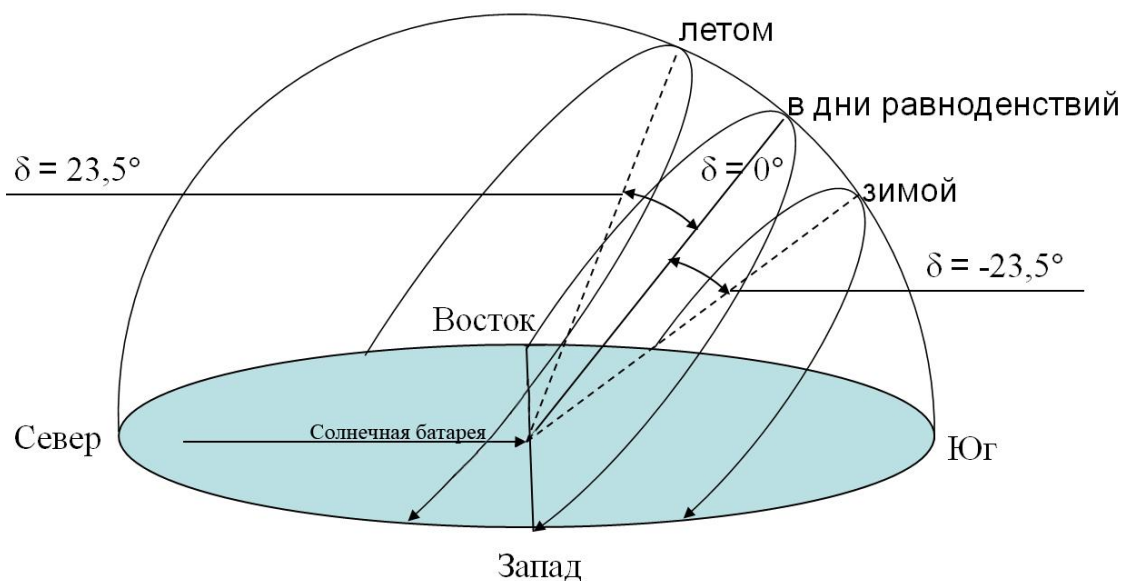


Рисунок 1 – Траектория движения Солнца относительно солнечной батареи по временам года

Солнце проходит через 360 градусов с востока на запад за день, но с точки зрения любого фиксированного положения в видимой части это составляет 180 градусов в течение среднего полудневного периода (больше весной и летом, меньше осенью и зимой). Из-за эффекта горизонта происходит уменьшение этого пути еще немного, что делает эффективным углом поворота трекара около 150 градусов. Солнечная батарея в фиксированной ориентации между восходом и закатом потеряет 75% энергии от максимально возможной выработки в утренние и вечерние часы. Поворот солнечной батареи на восток и запад может помочь вернуть эти потери.

Трекер вращающийся в направлении восток-запад известен как одноосевой.

Солнце также проходит через 47 градусов на север и на юг в течение года, таким образом изменяется его склонение. Поле солнечных батарей, установленных в средней точке между двумя крайними значениями склонения, сможет увидеть движение Солнца лишь на 23,5 градуса по обе стороны в течение года, в результате чего мы потеряем 8,3% энергии.

Чтобы избежать потерь энергии из-за сезонных изменений угла, был изобретен двухосевой трекер. Данный тип трекера отслеживает движение Солнца не только в течение дня, но и постепенно изменяет свой наклон в течение года вслед за изменением склонения.

Потери при использовании солнечных батарей увеличиваются также из-за изменений в продолжительности дня. Основное увеличение выработки происходит летом. Таким образом, когда панели наклонены ближе к средним углам лета, суммарные годовые потери уменьшены по сравнению с системой, наклоненной под углом, который совпадает с широтой местности.

Существует спор в данной отрасли, дает ли небольшая разница в ежегодной выработке между одно- и двухосевыми трекерами смысл создавать двухосевые трекеры. Обзор фактических статистических данных о производстве из южной части провинции Онтарио, Канада говорит о разнице около 4%, что было гораздо меньше, чем дополнительные расходы на двухосевую систему. Это сопоставление не так благоприятно как улучшение в 24-32% между фиксированной матрицей и одноосевым трекером.<sup>[12][13]</sup>

Несмотря на то, что фотоэлектрическая панель в стационарном положении может собрать большую долю доступной энергии в полдень, значительная мощность также доступна рано утром и позднее после обеда. В такие моменты солнечные батареи будут недополучать большое количество доступной для сбора солнечной энергии. Например, даже когда Солнце находится всего в 10° над горизонтом, доступная энергия может равняться

около половины энергии полудня (или даже больше, в зависимости от широты, времени года и атмосферных условий).

Таким образом, основным преимуществом системы слежения является сбор солнечной энергии в течение дня, а особенно в периоды восхода и заката, с наиболее точным выравниванием относительно положения Солнца, смещающегося в зависимости от сезона.

Кроме того, чем выше уровень концентрации, тем более важно становится точное отслеживание, так как доля энергии, получаемой от прямого излучения выше, а область, где сосредоточена энергия, становится меньше.

### 1.2.3. Состав солнечного трекера

Типовой состав системы солнечных батарей с применением солнечного трекера представлен на рисунке 2.

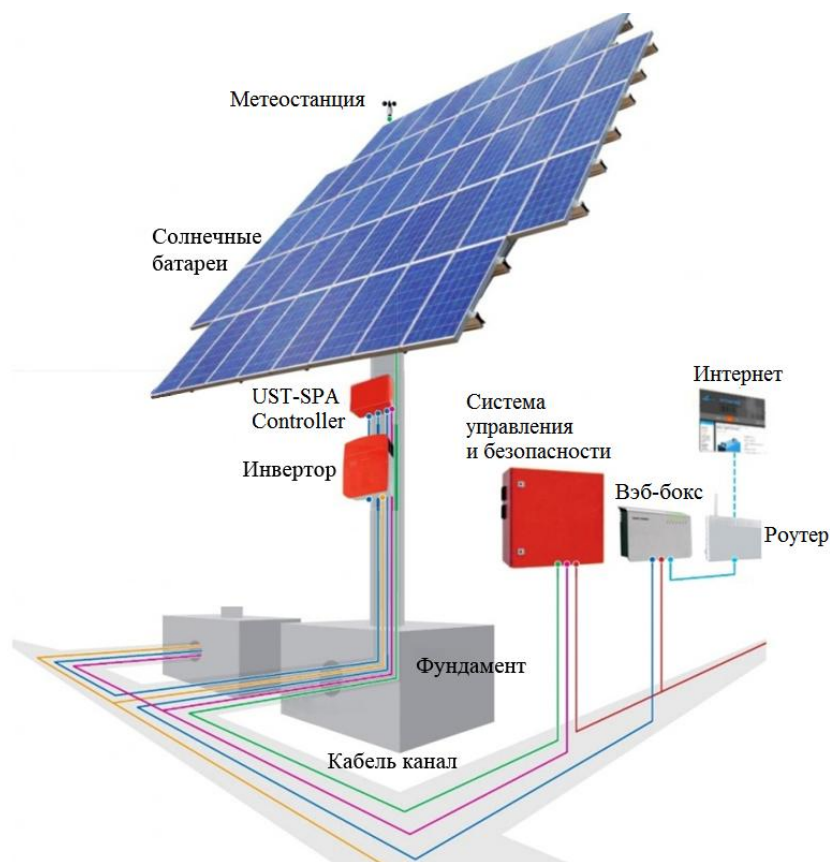


Рисунок 2 – Солнечный трекер в полной комплектации

Существует большое количество разновидностей комплектации трекера. Основной состав трекера строится из:

- Несущей части или фундамента. И подвижной части, которая задаёт горизонтальную, вертикальную или комбинированную оси поворота;
- Устройства управления подвижной частью, состоящей из двигателей, называемых актуаторами;
- Различных систем, включающих в себя бокс системы управления и безопасности, стабилизаторы, грозозащиту и метеостанцию;
- Контроллера системы управления для настройки и обслуживания энергосистемы;
- Роутера с подключением к интернету для отправки статистических данных и мониторинга системы или, другими словами, удалённым доступом;
- Системы навигации для определения географического положения. На стационарных трекерах система навигации применяется редко. Обычно поставщик во время монтажа задаёт значение широты, долготы, высоты над уровнем моря, где ставится трекер;
- Микроинвертора или инвертора, преобразующего постоянное напряжение в переменное. Обычно инверторы устанавливаются отдельно для всей системы внутри помещения.<sup>[14]</sup>

Чаще всего экономически невыгодно полностью комплектовать трекер, большинство данных элементов не устанавливаются для удешевления конструкции.

Надежность при построении конструкции трекера является одним из основных моментов. Система должна справляться с сильным порывами ветра, а с увеличением площади полезной нагрузки (количества солнечных батарей или коллекторов) парусность сильно увеличивается. Вес самих солнечных батарей также имеет значение.

Увеличение габаритов системы возникает чаще всего из-за необходимости перераспределить нагрузку на трекере.

В качестве исполнительных устройств в трекерах могут применяться различные типы двигателей: линейные, шаговые, серводвигатели.

Чтобы сравнить целесообразность использования шагового двигателя и серводвигателя составим таблицу 1.

Таблица 1 – сравнение шагового двигателя и серводвигателя

	Шаговый двигатель	Серводвигатель
Надежность	Высокая надежность, в связи с отсутствием изнашивающихся элементов. Рабочий ресурс зависит от подшипников	Основное количество современных бесколлекторных двигателей обладают высокой надежностью сравнимой с шаговым двигателем
Эффект потери шагов	Присуще свойство потери шагов при высоких нагрузках	Не наблюдается
Скорость перемещения	150—300 мм/сек	Скорость холостого перемещения 0,5—1 м/с
Динамическая точность	Рассогласование не превышает 20 мкм	точность до 1—2 мкм и выше
Стоимость	По сравнению с электродвигателями более высокая стоимость	Дорогостоящие датчики положения ротора, более высокая стоимость, чем у шагового двигателя

Иллюстрация применения линейных двигателей представлена на рисунке 3.

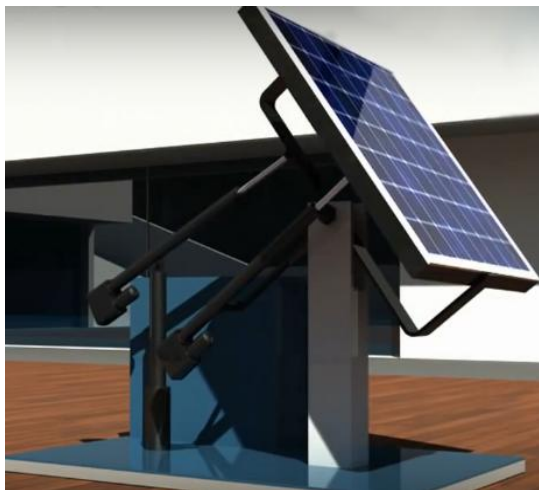


Рисунок 3 – Применение линейных двигателей  
в качестве исполнительных устройств

Вообще, тип применяемого двигателя зависит от конкретных условий разработки солнечной электростанции. Серводвигатели обладают слишком высокой точностью для применения в трекерах, а более разумное применение данных двигателей это высокоточные станки ЧПУ.

#### **1.2.4. Классификация трекеров**

Трекер выбирается в зависимости от условий, в которых он будет эксплуатироваться. Они включают в себя: широту местности, погодные условия, габариты установки, доступную площадь для установки и прочее.

Классифицируются трекеры по количеству и положению осей вращения.<sup>[15]</sup>

Трекер с одной осью вращения – Single axis trackers (SAT) называются одноосевыми.

Ось вращения данного типа трекеров может располагаться в любых координатных направлениях и использовать любой алгоритм слежения, например SPA (Solar Position Algorithm).

Существует несколько общих реализаций одноосевых трекеров. Они включают в себя трекеры с горизонтальной осью вращения (HSAT),

вертикальной осью вращения(VSAT), с наклонной осью вращения(TSAT) и с полярно-ориентированной осью вращения (PSAT).

Трекеры с горизонтально ориентированной осью - Horizontal single axis tracker (HSAT) имеют ось вращения, расположенную горизонтально по отношению к земле. На рисунке 4 представлен данный тип трекера.

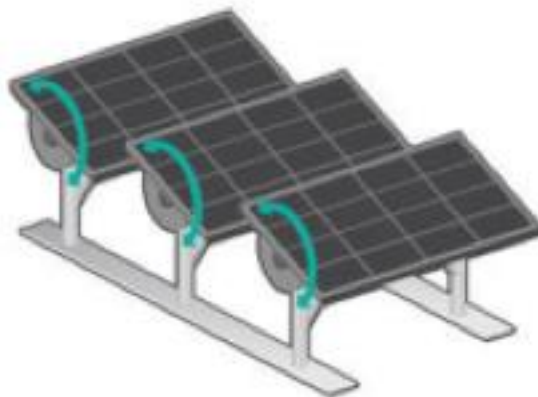


Рисунок 4 – Трекер с горизонтально ориентированной осью вращения

Оси вращения каждого ряда солнечных батарей располагаются параллельно друг другу. В зависимости рельефа местности определенный интервал между соседними рядами осей поможет увеличить выработку всей системы.

В HSAT длинные горизонтальные трубы опираются на подшипники, установленные на пилонах. Оси трубок ориентированы на линии север-юг. Панели монтируются на трубке, а трубка будет вращаться вокруг своей оси, чтобы отслеживать видимое движение солнца в течение дня.

Вторая разновидность – это трекеры с вертикальной осью вращения — Vertical single axis tracker (VSAT), в которых ось вращения вертикальна по отношению к земле. Трекер изображен на рисунке 5. Данный вид трекеров вращается вслед за Солнцем в течение дня. Такие трекеры являются более эффективными в высоких широтах, чем HSAT. При построении полей с данным типом трекеров также необходимо учитывать затенение от соседних рядов, чтобы избежать ненужных потерь энергии и максимально задействовать доступную рабочую площадь.

VSAT обычно имеют конструкцию, ориентированную под углом по отношению к оси вращения, а полезная нагрузка (например, фотоэлементы) устанавливаются на неё.



Рисунок 5 – Трекер с вертикально ориентированной осью вращения

Следующий вид одноосевых трекеров – это трекеры с одной наклонной осью вращения — Tilted single axis tracker (TSAT), ось вращения в данных трекерах располагается между горизонтальной и вертикальной. Фото данного трекера изображено на рисунке 6.

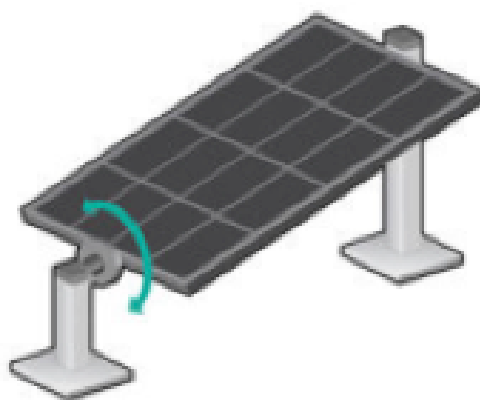


Рисунок 6 – Трекер с одной наклонной осью вращения

Второй тип трекеров – это трекеры с двумя осями вращения — Dual axis trackers (DAT) или двухосевые.



DAT имеют две степени свободы, которые выступают в качестве осей вращения. Эти оси, как правило, не связаны друг с другом, но работают вместе.

Существует несколько общих реализаций двухосевых трекеров. Они классифицируются по направленности их основной оси по отношению к земле. Два наиболее распространенных вида двухосевых трекеров :TTDAT и AADAT.

Трекер с двумя осями вращения на несущем столбе – Tip-tilt dual axis tracker (TTDAT), названы таким образом, потому что массив с панелями монтируется на конце длинного столба. Данный трекер представлен на рисунке 7. Движение трекера с востока на запад управляется поворотом массива вокруг верхнего полюса, на котором закреплён подшипник. В верхней части вращающегося подшипника находится механизм, который обеспечивает вертикальное вращение панелей и обеспечивает основные точки крепления для массива панелей.



Рисунок 7 – Трекер с двумя осями вращения на несущем столбе

Рекомендации по установке полей с TTDAT точно такие же как и для любых других видов или типов трекеров.

Оси вращения TTDAT, обычно выравниваются либо по северному меридиану или по линии широты восток-запад.

Трекер с двумя осями вращения и опорной плоскостью — Azimuth-altitude dual axis tracker (AADAT), в которых главная ось – вертикальная. Представлен на рисунке 8. Они похожи на TTDAT, но они отличаются по способу поворота массива. Вместо вращающегося массива вокруг верхнего полюса столба, AADAT системы обычно используют большое кольцо, установленное на земле или платформе. Вся система устанавливается на ролики или на большую платформу с подшипниками.<sup>[16]</sup>

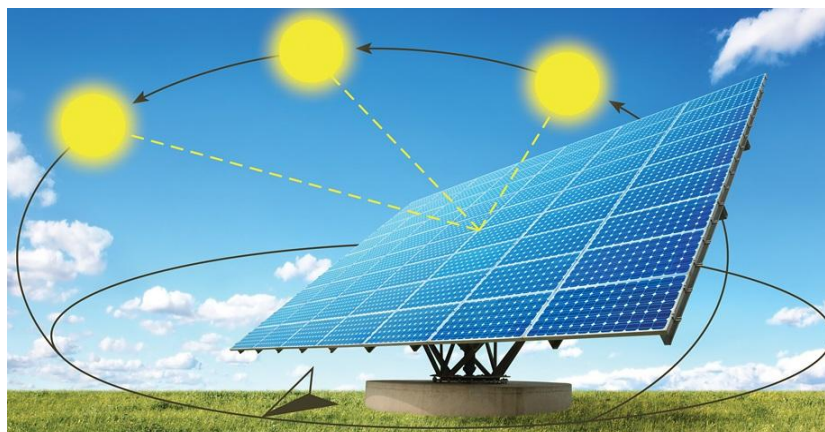


Рисунок 8 – Трекер с двумя осями вращения и опорной плоскостью

Основным преимуществом такого расположения является то, что вес массива распределяется по частям кольца, в отличие от одной точки загрузки полюса в TTDAT. Это позволяет AADAT поддерживать гораздо больший массив солнечных панелей или отражателей, в отличие от TTDAT, однако, системы AADAT не могут быть размещены ближе друг к другу, чем диаметр кольца, что может привести к снижению плотности застройки системы, особенно с учетом меж-трекерного затенения.

В основном говорят о плюсах от использования любых типов трекеров, но необходимо использовать правильный трекер по правильным причинам. Вообще, двухосевые трекеры являются более точными при концентрировании прямо на Солнце, которое обычно является ярким пятном в небе, однако, двухосевые трекеры стоят дороже и с течением времени быстрее теряют свою надежность, чем одноосевые. С другой стороны

одноосевой предлагает более низкую стоимость и более высокую надежность, так как есть меньше вещей, которые могут пойти не так при эксплуатации системы, которая может, как ожидается, превышать 20 лет или более. Рассмотрите группу двухосевых трекеров в пасмурный день, и вы увидите их рассредоточение по всему небу. Между тем, группа одноосевых трекеров будет смотреть в одном направлении и производить примерно такое же количество энергии в час с намного меньшими потерями.

Какой выбрать тип трекера зависит от того, где вы находитесь на Земле. В преимущественно солнечных областях, таких как пустыни и экваториальные регионы атмосфера обычно яснее. Эти регионы имеют высокий "Индекс ясности неба" больше, чем 0.7 - 0.8 или более.

Индекс ясности неба является мерой того, насколько прозрачным является небо. Как сильно облака поглощают, отражают или преломляют энергию Солнца. Низкая ясность рассеивает свет, как в туманный или пасмурный день. Высокая прозрачность около 0.7 - 0.8 это очень солнечный день с небольшим затуманиванием или облачностью в атмосфере. Здесь двухосевой трекер оправдывает своё применение и может достичь производства энергии на 40-45% больше, чем в фиксированном положении, при идеальном наклоне для данной широты. Но большинство из развитого мира живут в умеренном климате, где индекс ясности неба редко лучше, чем 0.5, как, например, в большей части Северной Америки, не считая солнечного юга США.

Таким образом, для разработки нашего устройства был выбран одноосевой тип солнечного трекера, как более простой в изготовлении и эксплуатации.

Небольшие модификации в конструкции помогут провести эксперимент по сравнению энергетической выработки при наклонной оси вращения и стационарной установкой, а также при вертикальной оси вращения, и сравнить оба эксперимента между собой.

### 1.2.5. Способы управления системой ориентации трекера

Существует несколько способов управления системой ориентации трекера.

Первый способ подразумевает использование фотоприемников. Фотоприёмники это датчики получающие информацию о местоположении Солнца на небе. Они дают информацию о том, как нужно сориентировать солнечные батареи. Существенный минус этого способа заключается в том, что в облачную или пасмурную погоду информация с фотоприёмников будет разниться, и солнечную батарею не удастся навести в нужное положение.

Другой способ это использовать ручное управление. Управляя актуаторами можно установить солнечные батареи в заранее записанные положения (используя переключатели). В течение дня толком использовать такой способ невозможно, а вот для сезонного применения он достаточно эффективен, когда необходимо изменить угол наклона трекера относительно земли вслед за изменением склонения Солнца.

Следующий способ это применение таймера. Благодаря его использованию устройства, отвечающие за ориентацию в трекере, будут поворачивать солнечную батарею по времени движения Солнца в течение дня.

Но наилучший способ это программное управление механизмом вращения. Рассчитав местоположение Солнца в определенный момент времени, специальное программное обеспечение передаёт эту информацию на электростанцию, и с учётом полученных данных трекер устанавливает угол наклона всего поля солнечных батарей и направляет их в нужную сторону.

Каждый из способов управления подходит для различных условий. Для частного использования подойдет ручной способ управления с изменением угла наклона два раза за год (весной и осенью). Экономически не

целесообразно устанавливать трекеры для нескольких панелей или коллекторов. Для крупных электростанций или полей с солнечными батареями актуален только программный способ управления трекерами.

Для нашего эксперимента подойдет только программный способ, так как потребуется управлять трекером по заранее написанному алгоритму и собирать статистическую информацию о выработке энергии в течение дня. Также в программе потребуется использовать таймер для считывания информации через равные промежутки времени в течение часа, например раз в пять минут.

## 2.Схемотехническая часть

При разработке схемотехнической части работы нашего трекера воспользуемся методом составления блок-схемы, которая поможет представить из каких частей должна строиться электрическая схема устройства. На рисунке 9 представлена такая блок-схема.

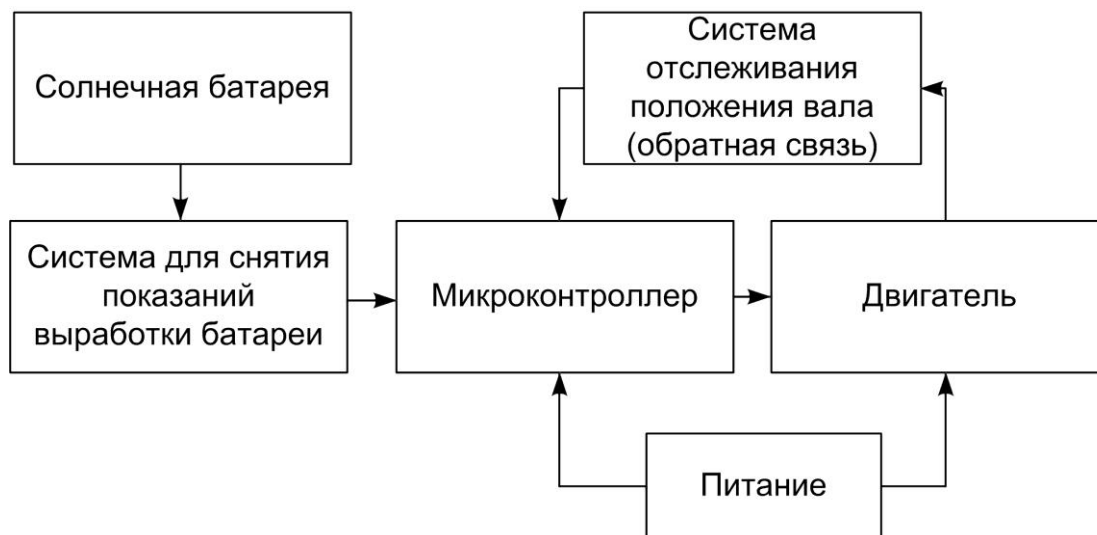


Рисунок 9 – блок-схема для построения электрической схемы устройства

Первый возникающий вопрос при разработке устройства трекера – это выбор двигателя для вращения солнечной батареи. Выбор происходил между шаговым двигателем и сервоприводом, который имеет обратную связь, и любое его положение мы знаем заранее и наверняка.

Выберем шаговый двигатель 28BYJ-48, как имеющий достаточную точность для солнечного трекера, меньшую цену, чем сервопривод и обладающего хорошей надежностью. В качестве драйвера для двигателя используем микросхему ULN2003, которая часто продаётся в комплекте с данным двигателем.

Для управления процессом вращения шагового мотора, работы датчиков и определения точки максимальной мощности будем использовать микроконтроллер Arduino, в частности плату Arduino Nano. Данная линейка микроконтроллеров обрела большую популярность в мире, благодаря

простоте своего интерфейса, как аппаратного и программного, а также скоростью обработки данных, набором портов ввода/вывода и многими прочими возможностями.<sup>[17]</sup>

Для работы нашего микроконтроллера и двигателя необходимо питание. Получать питание мы можем несколькими способами, такими как подключение через USB, от внешнего источника питания или от аккумуляторной батареи. Выберем для питания подключение через USB. В данном случае микроконтроллер и двигатель также смогут питаться от источника напряжения 220В через блок питания.

Так как система поворота солнечной батареи базируется на вращении вала шагового двигателя, при первоначальном запуске системы нам необходимо задавать точку отсчёта. То есть, необходима система, которая поможет отслеживать положение вала.

С этой задачей можно справиться, если использовать какой-либо датчик, при срабатывании которого вращение вала остановится в нужном нам положении, и данное положение мы примем за нулевое (точка отсчёта). Программным методом мы зададим точку отсчёта и будем считать шаги двигателя от данного положения.

На рисунке 10 представлена принципиальная схема устройства, по которой будет объясняться дальнейший принцип работы.<sup>[18]</sup>

В процессе разработки устройства были перепробованы различные варианты установки точки отсчёта, такие как использование лазера и фоторезистора, применение датчика холла, оптопары.

Было принято решение использовать геркон SF1 и расположенный на конструкции держателя солнечной батареи магнит. Вал, вращаясь против часовой стрелки, «доставляет» магнит к геркону, в результате чего последний замыкается и подает управляющий сигнал на микроконтроллер Arduino с целью остановки вала двигателя и фиксации нулевого положения. Подробное описание конструкции находится в следующей части записки.

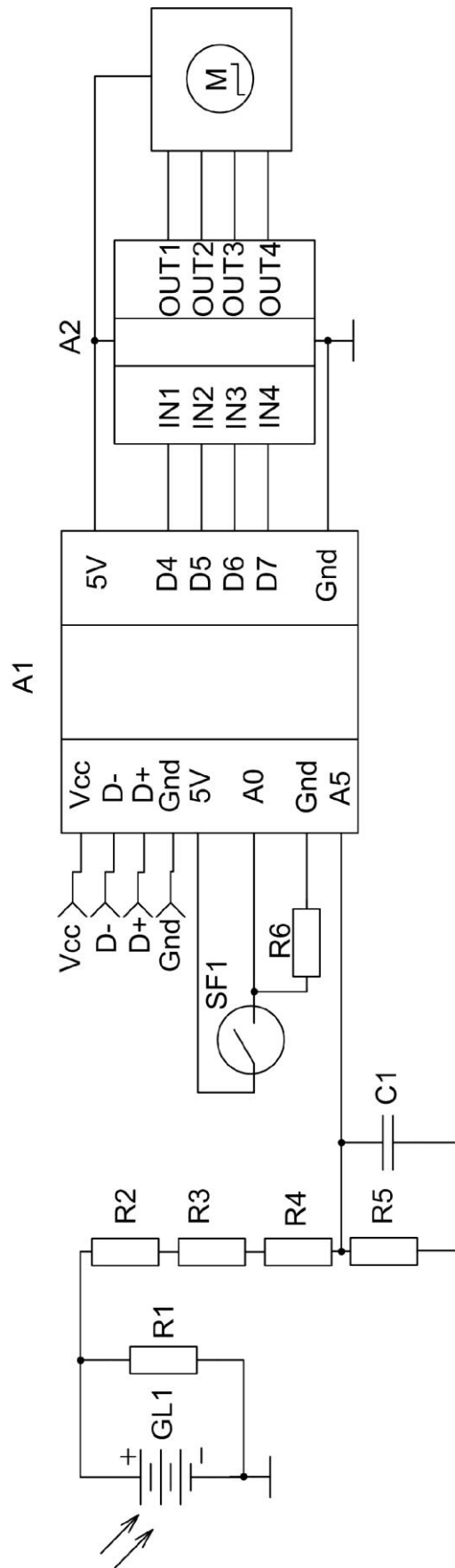


Рисунок 10 – Принципиальная схема солнечного трекера



Порт аналого-цифрового преобразователя (АЦП) А0 микроконтроллера ожидает замыкания геркона SF1 и приёма управляющего сигнала. До тех пор, пока на данный порт не подается никаких сигналов, он будет выдавать случайные значения преобразования, в результате собственных шумов и наводок из внешней среды. Для того чтобы этого не происходило, мы подключаем порт А0 на землю через резистор R5 в 10кОм, используемый для ограничения тока. Без использования резистора в результате «срабатывания» геркона микроконтроллер замкнется своим внутренним источником питания напрямую на землю и выйдет из строя как при коротком замыкании.

После остановки вращения вала, от принятой точки отсчёта будет происходить следующий этап движения шагового мотора М с целью поиска максимума выработки.

Управляющие сигналы с цифровых портов D4-D7 микроконтроллера поступают на порты IN1-IN4 драйвера шагового двигателя ULN2003. В свою очередь, получая управляющие сигналы, которые представляют собой логические сигналы с высоким или низким значением напряжения, драйвер подаёт ток на обмотки статора шагового мотора 28BYJ-48, заставляя вращаться ротор в нужном нам направлении на заданный угол, с определенной скоростью.

Солнечная батарея на схеме обозначается GL1. Мощность данной солнечной батареи 3Вт, а выдаваемое ею напряжение до 15В на холостом ходу при ярком солнечном свете.

Определять точку максимальной выработки будем по напряжению резистора R4 считываемого АЦП с порта микроконтроллера А5.

В зависимости от сопротивления нагрузки значения, измеряемые АЦП, могут превосходить максимально допустимые значения. Также, так как АЦП микроконтроллера работает в диапазоне напряжений от 0 до 4,1В, используем делитель напряжения из резисторов R1-R4 номиналами по 12кОм.

Конденсатор С1, имеющий ёмкость 1мкФ, подключенный параллельно резистору R4, используется как сглаживающий фильтр, чтобы уменьшить пульсацию напряжения с солнечной батареи, которое имеет место быть при демонстрации устройства в помещении с искусственным освещением.

Процессы, происходящие во время поиска максимума, описаны в следующей части работы, где рассказывается о программной реализации работы трекера.

### 3. Разработка конструкции

В результате разработки устройства было создано два вида его конструкции.

Первый вид конструкции предназначен для проведения эксперимента с вертикально ориентированной осью вращения. Его конструкция и процесс вращения представлены на рисунке 11.

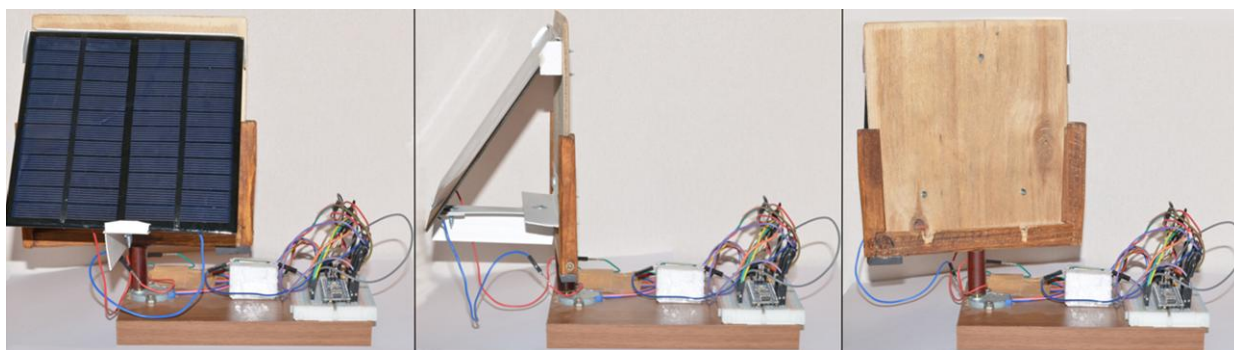


Рисунок 11 – Разработанный трекер с вертикально ориентированной осью вращения

Второй вид конструкции разработанного трекера, представленный на рисунке 12, предназначен для проведения эксперимента с наклонной осью вращения.

Для задания нужного угла наклона необходимо приподнять устройство и обеспечить надежную фиксацию при проведении эксперимента.

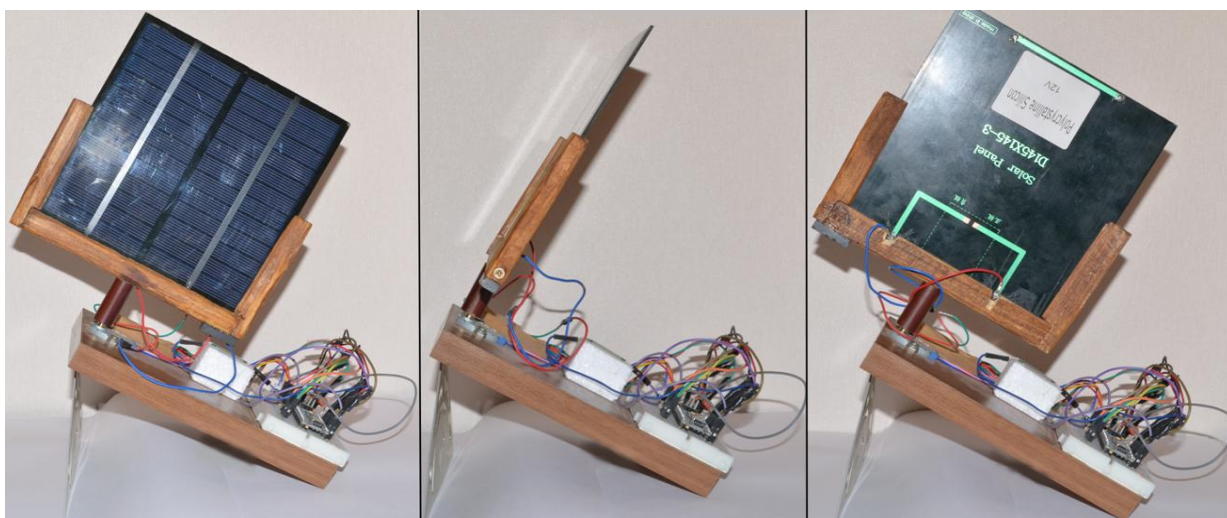


Рисунок 12 – Разработанный трекер с наклонной осью вращения

Устройство трекера можно увидеть на рисунке 13.

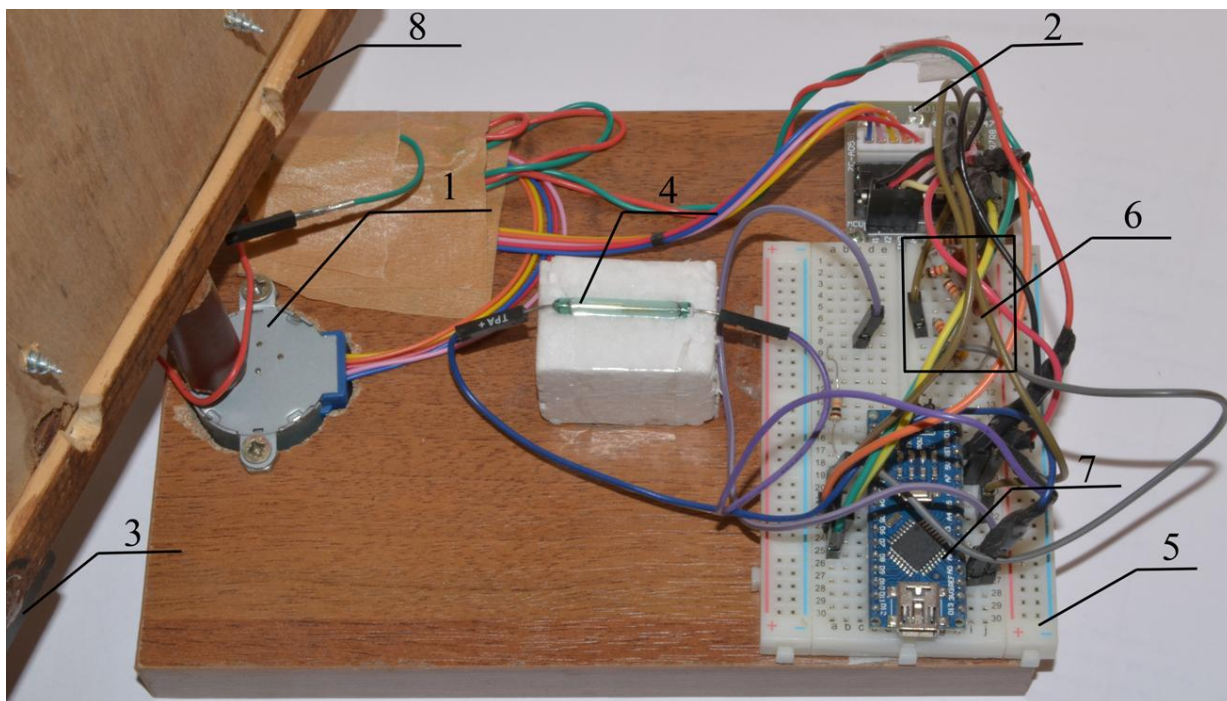


Рисунок 13 – Устройство разработанного солнечного трекера

Вся электрическая и механическая часть устройства располагается на деревянном бруске.

Шаговый двигатель 1, закрепленный в основании деревянного бруска, соединяется с драйвером 2, который в свою очередь подключен к микроконтроллеру 7 и получает от него управляющие сигналы. Для удобства все электрические соединения производятся на монтажном поле 5. В области 6 находится сопротивление нагрузки и делитель напряжения с конденсатором, которые подключаются к солнечной батарее, находящейся на держателе 8. Держатель 8 также соединен с осью вращения шагового двигателя 1. В процессе вращения постоянный магнит 3, закрепленный снизу держателя 8, для фиксации нулевого положения перемещается в область с герконом 4.

## 4. Программная часть

Для реализации программного управления работы трекера необходимо запрограммировать микроконтроллер Arduino на языке программирования основанном на C/C++.<sup>[19]</sup>

В результате разработки программной части работы устройства были созданы различные варианты работы. Например, одним из таких вариантов работы был поиск максимума освещенности, когда вал шагового двигателя двигался сначала по 10 градусам и считывал напряжение солнечной батареи, а затем по 1 градусу в области вокруг предполагаемого максимума для более точного поиска.

Данный вариант поиска максимума можно назвать двухэтапным, так как мы ищем максимум за два прохода. Этот вариант работы давал большую точность поиска, но затрачивал много энергии.

На основе данной программы был создан одноэтапный вариант поиска, который позволяет за один проход вала найти максимум освещенности.

В приложении А представлена программа, полностью отражающая работу нашего солнечного трекера для эксперимента с комментариями о её работе. Необходимо пояснить основные моменты и тонкости работы программы. Блок-схема алгоритма (БСА) программы представлена на рисунках 14, а–в.<sup>[20]</sup>

Первым делом подключаем стороннюю библиотеку AccelStepper для управления шаговым двигателем и определяем различные переменные записи/хранения и состояния устройства (например, такие как «flag\_1»–«flag\_8»).

В функции «void setup()», вызываемой, когда запускается программа, мы задаем начальные установки работы трекера, такие как скорость вращения вала и темп разгона/торможения двигателя. Данная функция вызывается лишь раз после подачи питания.

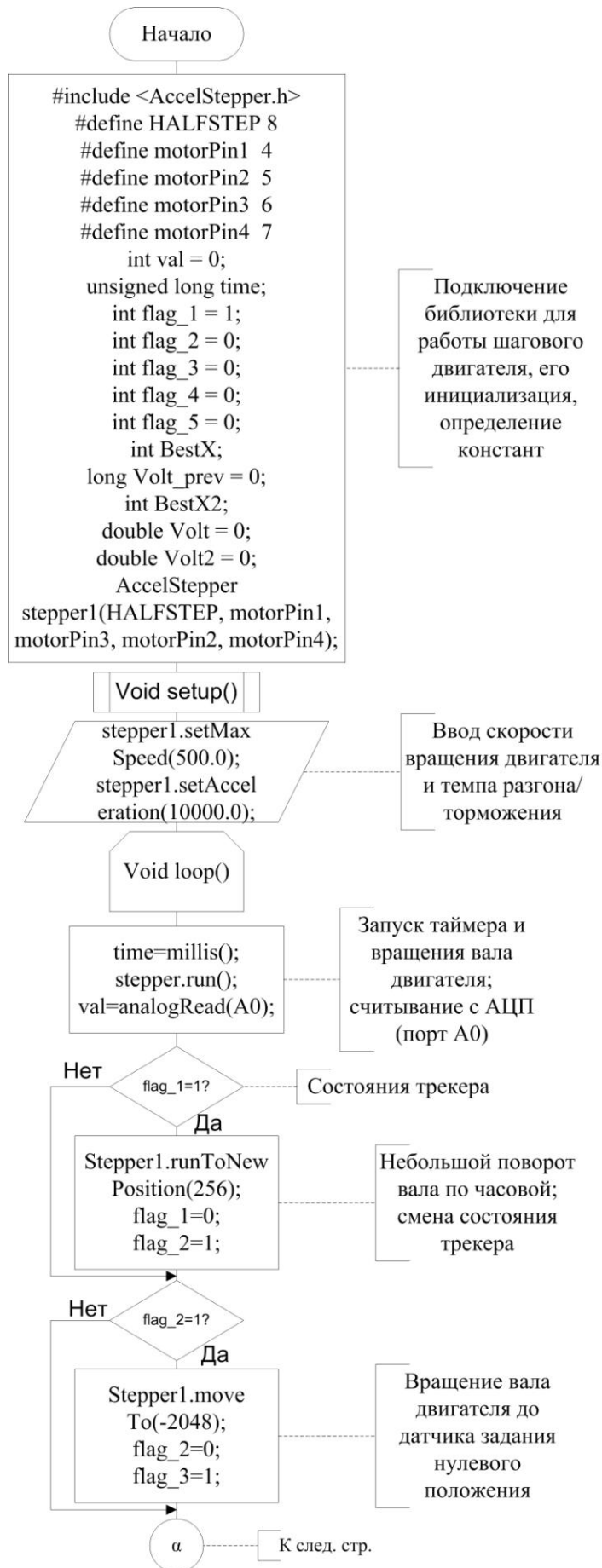


Рисунок 14а – БСА программы



Рисунок 146 – БСА программы

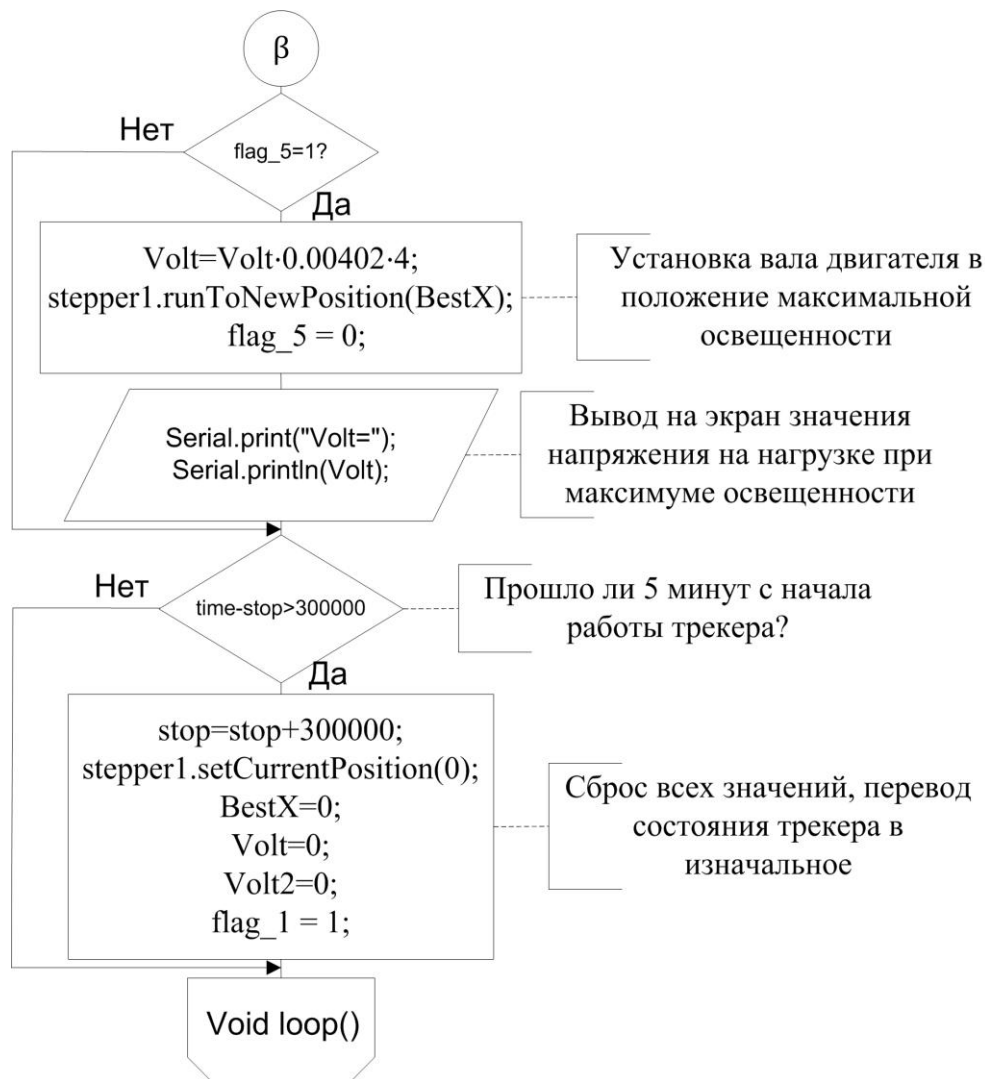


Рисунок 14в – БСА программы

Затем запускается основной цикл, который вызывается функцией «void loop()». Данная функция делает точно то, что говорится в её названии, а точнее работает в цикле. Она позволяет нашей программе выполнять вычисления, производить различные действия и реагировать на них.

Так как основная функция выполняется в цикле, а в работе солнечного трекера имеется последовательность действий, которую необходимо совершать после каждого запуска работы устройства или программы, все основные действия будут совершаться с использованием условного оператора условия «if» и переменных, отображающих состояние устройства.



Таким образом, следующее действие в работе трекера, например процесс поиска максимума после установки нулевого положения, не начнется до тех пор, пока не закончится предыдущее, и соответственно состояние устройства не перейдет из одного в другое, а переменная из единицы в ноль или наоборот.

Следует отдельно рассказать о работе шагового двигателя. Задаем работу данного двигателя в полушаговом режиме («HALFSTEP») или 8-шаговой управляющей сигнальной последовательности и определяем управляющие выходы («motorpin1»–«motorpin4»). Таким образом, за полный оборот мотор совершает 4096 шагов. Тип двигателя: униполярный. Питается 28BYJ-48 от 5 вольт напряжения. Передаточное отношение редуктора 64:1.

После процесса определения начальной точки (описанного в схемотехнической части), находящейся в крайнем левом положении, мотор движется на 180 градусов по часовой стрелке с небольшой скоростью и считывает значения напряжения на нагрузке солнечной батареи каждые пол градуса вращения.

С помощью оператора цикла «for» задаем угол поворота двигателя в 0.5 градуса и угол, до которого будет вращаться вал мотора относительно нулевого положения, т.е. до крайнего правого положения. В процессе поиска происходит запись напряжения на нагрузке в переменную «Volt» в среднем положении (направление на южную сторону света) и напряжения при максимальной освещенности в переменную «Volt2».

Поиск будет происходить раз в 5 минут в течение дня по таймеру, задаваемому функцией «millis».

Таким образом, раз в 5 минут в течение половины дня (в связи с местом проведения эксперимента), мы сможем снимать напряжение в стационарном положении солнечной батареи направленной на юг и в тот же момент времени в положении максимальной освещенности. Полученную выработку энергии в обоих случаях можно будет сравнить между собой.

Данный эксперимент будет проведен дважды в солнечные дни. Время начала эксперимента 12:40 (в это время Солнце находится в пике) до заката, таким образом, мы получим достаточно информации о выработке за день, так как выработка от рассвета до полудня такая же, как от полудня до заката.

Первый эксперимент пройдет для вертикальной оси вращения, а второй для наклонной оси вращения под тем же углом расположения солнечной батареи относительно земли. Полученную выработку также можно будет сравнить между собой для двух различных осей вращения (двух видов одноосевых солнечных трекеров).

В качестве демонстрационной установки была написана программа, которая осуществляет постоянное отслеживание перемещающегося в пространстве источника света.

## 5. Исследовательская часть

### 5.1. Снятие вольт-амперной характеристики солнечной батареи

При разработке трекера были сняты вольт-амперные характеристики солнечной батареи (СБ) при различной освещенности: в условиях яркого солнечного света, пасмурности, различных углах наклонах.

Приведем таблицы зависимостей ВАХ при ярком солнечном излучении и различными условиями, где  $l_{m1}$  – плоскость солнечной батареи перпендикулярна Солнцу;  $l_{m2}$  – плоскость солнечной батареи перпендикулярна к Солнцу и батарея находится за стеклом;  $l_{m3}$  – между солнечным излучением и плоскостью солнечной батареи 60 градусов;  $l_{m4}$  – между солнечным излучением и плоскостью солнечной батареи 60 градусов и батарея находится за стеклом.

Таблица 2 – ВАХ солнечной батареи при условиях  $l_{m1}$  и  $l_{m2}$

R, Ом	$l_{m1}$			$l_{m2}$		
	U, В	I, мА	P, мВт	U, В	I, мА	P, мВт
6.6	0.82	124	102	0.68	103	70
22.7	2.73	120	328	2.32	102	237
44.7	5.2	116	605	4.2	94	395
110.4	9.84	89	877	8.62	78	673
230	12.82	56	715	11.95	52	621
252.7	12.85	51	653	12	47	570
274.7	12.89	47	605	12.14	44	537
340.4	13.05	38	500	12.26	36	442
477	13.3	28	371	12.85	27	346
922	13.5	15	198	13.27	14	191
$\infty$	14.05	0	0	13.57	0	0

Таблица 3 – ВАХ солнечной батареи при условиях  $l_{m3}$  и  $l_{m4}$

R, Ом	$l_{m3}$			$l_{m4}$		
	U, В	I, мА	P, мВт	U, В	I, мА	P, мВт
6.6	0.51	77	39	0.3	45	14
22.7	1.75	77	135	1.03	45	47
44.7	3.18	71	226	2.01	45	90
110.4	6.74	61	411	4.5	41	183
230	10.8	47	507	8	35	278
252.7	11.02	44	481	8.25	33	269
274.7	11.45	42	477	9.1	33	301
340.4	11.8	35	409	10.08	30	298
477	12.63	26	334	11.23	24	264
922	12.83	14	179	12.2	13	161
$\infty$	13.27	0	0	12.94	0	0

Проинтерполируем найденным значениям в математическом пакете MathCad 15 и представим полученные ВАХ в виде графика на рисунке 15.

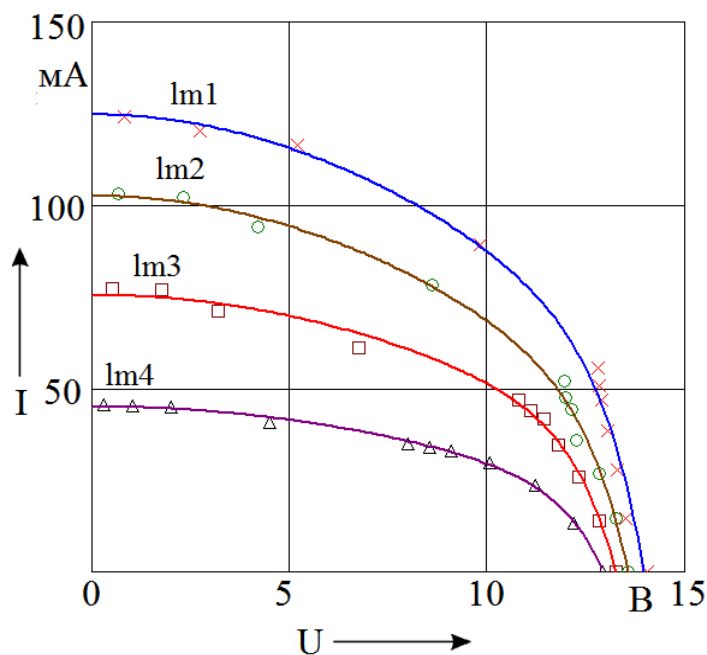


Рисунок 15 – ВАХ солнечной батареи при различной освещенности

В результате интерполяции была найдена формула, дающая приближенное выражение функции ВАХ солнечной батареи:

$$f(u, K) = K_0 + K_1 e^u + K_2 u^2,$$

где  $u$  – напряжение СБ;

$K_0$ - $K_2$  – коэффициенты интерполяции.

Были подобраны коэффициенты для каждого случая освещенности  $Im1$ – $Im4$ , которые представлены на рисунке 16.

Весь процесс расчётов в математическом пакете Mathcad 15 можно увидеть в приложении Б.

$$K_{Im1} = \begin{pmatrix} 124.699 \\ -4.623 \times 10^{-5} \\ -0.363 \end{pmatrix} \quad K_{Im3} = \begin{pmatrix} 75.297 \\ -5.99 \times 10^{-5} \\ -0.224 \end{pmatrix}$$

$$K_{Im2} = \begin{pmatrix} 102.505 \\ -5.371 \times 10^{-5} \\ -0.329 \end{pmatrix} \quad K_{Im4} = \begin{pmatrix} 44.926 \\ -4.832 \times 10^{-5} \\ -0.147 \end{pmatrix}$$

Рисунок 16 – интерполяционные коэффициенты ВАХ солнечной батареи при различной освещенности

Например, в случае освещенности  $Im1$  получим формулу:

$$I = 124,699 - 4,623 \times 10^{-5} e^U - 0,363 U^2$$

Можем сделать вывод о том, что солнечная батарея теряет 20-25% мощности, если расположить её за стеклом, которое будет отражать часть солнечного излучения. Большой угол между плоскостью солнечной батареи и солнечным излучением соответственно также уменьшает энергетическую выработку.

Проинтерполируем и представим график зависимость мощности СБ от сопротивления нагрузки  $P(R)$  на рисунке 17.

Для упрощения задачи нахождения кривых  $P(R)$  воспользуемся методом интерполяции сплайнами, как быстрым и эффективным способом интерполяции функций.

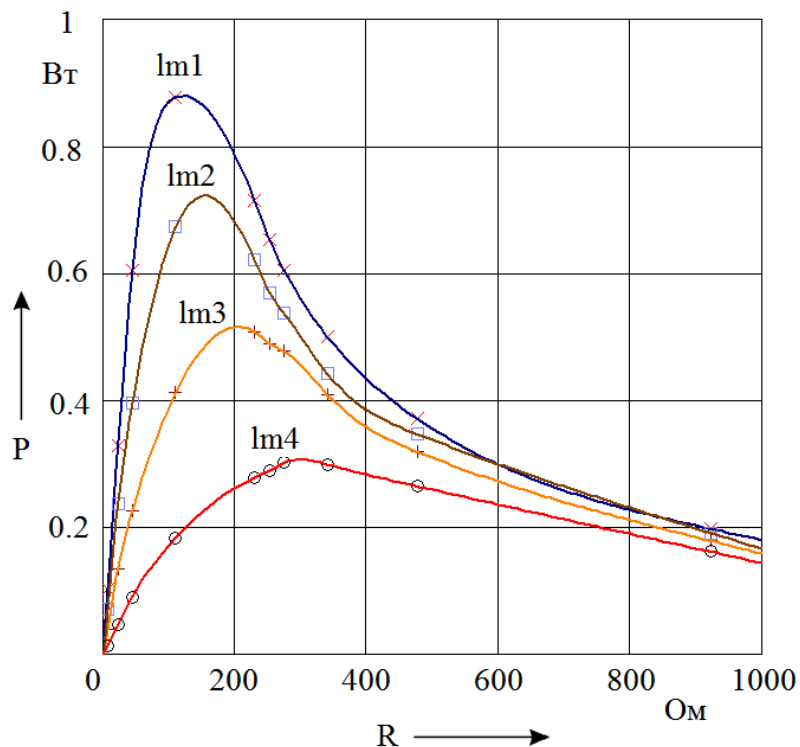


Рисунок 17 – График зависимости мощности СБ от сопротивления нагрузки  $P(R)$

При ярком солнечном свете в случае  $lm1$  нагрузка в 110.4 Ом показывает наибольшую мощность, но для проведения основного эксперимента и для дальнейшей эксплуатации устройства установим нагрузку в 230 Ом. С данной нагрузкой трекер будет выдавать приемлемую выработку электроэнергии в условиях облачности, а также будет лучше реагировать в помещениях при искусственном освещении.

Отснятые зависимости (особенно рассчитанная зависимость мощности СБ от сопротивления) показательно демонстрируют, что в зависимости от нагрузки рабочая точка солнечной батареи может быть сдвинута в область минимальной или даже нулевой выработки. Вследствие этого важным моментом является согласование солнечной батареи с нагрузкой.

## 5.2. Проведение основного эксперимента

Суть эксперимента: сравнение энергетической выработки при стационарной установке солнечной батареи и использованием солнечной батареи с применением одноосевого солнечного трекера с наклонной и вертикальной осями вращения.

Эксперимент проводится, начиная с 12:40 (время пика Солнца в г. Тольятти), сначала для наклонной оси вращения, затем в другой день для вертикальной оси вращения (углы наклона СБ для обоих видов вращения  $53^\circ$ , данный угол является оптимальным годовым углом для г. Тольятти). С интервалом в 5 минут снимаются значения напряжения на нагрузке. Трекер поворачивает двигатель с запада на восток, фиксируя значение напряжения на юге (стационарная установка СБ) и значение максимума солнечной освещенности. Полученные данные сравниваются между собой.

При проведении эксперимента было получено 83 значения напряжения на нагрузке для каждого варианта установки солнечной батареи в течение дня, преобразуем полученные данные в мощность, как отношение квадрата измеренного напряжения к сопротивлению нагрузки, и представим их в таблице 4.

Линейно проинтерполируем полученные значения и представим графики зависимостей мощности от времени.

На рисунке 18 представлены графики зависимости мощности от времени при проведении эксперимента с наклонной осью вращения, где  $p_1$  – выработка при стационарной установке СБ,  $p_2$  – выработка с использованием трекера с наклонной осью вращения.

На рисунке 19 представлены графики зависимости мощности от времени при проведении эксперимента с вертикальной осью вращения, где  $p_1$  – выработка при стационарной установке СБ,  $p_2$  – выработка с использованием трекера с вертикальной осью вращения.

Таблица 4 – Результаты, полученные при проведении экспериментов

Время t, ч:мин	Наклонная ось вращения				Вертикальная ось вращения			
	стационарная установка p2		использование трекера p1		стационарная установка p2		использование трекера p1	
	U, В	P, Вт	U, В	P, Вт	U, В	P, Вт	U, В	P, Вт
12:40	14,52	0,917	14,65	0,933	14,02	0,855	14,15	0,871
12:45	14,18	0,874	14,28	0,887	13,3	0,769	13,44	0,785
12:50	14,07	0,861	14,17	0,873	13,35	0,775	13,41	0,782
12:55	13,86	0,835	13,99	0,851	13,54	0,797	13,68	0,814
13:00	13,67	0,812	13,83	0,832	13,38	0,778	13,51	0,794
13:05	13,81	0,829	14,01	0,853	13,54	0,797	13,65	0,81
13:10	13,89	0,839	14,07	0,861	13,49	0,791	13,7	0,816
13:15	13,72	0,818	13,94	0,845	13,46	0,788	13,62	0,807
13:20	13,70	0,816	13,91	0,841	13,64	0,809	13,78	0,826
13:25	13,68	0,814	13,86	0,835	13,54	0,797	13,73	0,82
13:30	13,75	0,822	13,93	0,844	13,44	0,785	13,59	0,803
13:35	13,68	0,814	13,86	0,835	13,12	0,748	13,33	0,773
13:40	13,70	0,816	13,91	0,841	13,48	0,79	13,72	0,818
13:45	13,80	0,828	14,09	0,863	13,54	0,797	13,78	0,826
13:50	13,70	0,816	13,91	0,841	13,59	0,803	13,75	0,822
13:55	13,62	0,807	13,83	0,832	13,35	0,775	13,59	0,803
14:00	13,63	0,808	13,84	0,833	13,51	0,794	13,72	0,818
14:05	13,64	0,809	13,86	0,835	13,46	0,788	13,67	0,812
14:10	13,72	0,818	13,9	0,84	13,59	0,803	13,83	0,832
14:15	13,80	0,828	14,09	0,863	13,56	0,799	13,78	0,826
14:20	13,59	0,803	13,81	0,829	13,39	0,78	13,67	0,812
14:25	13,52	0,795	13,88	0,838	13,51	0,794	13,83	0,832
14:30	13,64	0,809	13,94	0,845	13,51	0,794	13,76	0,823
14:35	13,56	0,799	13,86	0,835	13,6	0,804	13,8	0,828
14:40	13,52	0,795	13,89	0,839	13,41	0,782	13,65	0,81
14:45	13,59	0,803	13,81	0,829	13,51	0,794	13,76	0,823
14:50	13,51	0,794	13,88	0,838	13,52	0,795	13,78	0,826
14:55	13,65	0,81	13,95	0,846	13,52	0,795	13,84	0,833
15:00	13,56	0,799	13,86	0,835	13,38	0,778	13,68	0,814
15:05	13,64	0,809	13,94	0,845	13,36	0,776	13,65	0,81
15:10	13,56	0,799	13,88	0,838	13,19	0,756	13,52	0,795
15:15	13,52	0,795	13,91	0,841	13,47	0,789	13,47	0,789
15:20	13,51	0,794	13,88	0,838	12,99	0,734	13,56	0,799
15:25	13,28	0,767	13,8	0,828	13,06	0,742	13,67	0,812
15:30	13,23	0,761	13,73	0,82	13,01	0,736	13,62	0,807
15:35	13,07	0,743	13,68	0,814	12,85	0,718	13,59	0,803
15:40	12,94	0,728	13,52	0,795	12,7	0,701	13,49	0,791
15:45	13,23	0,761	13,8	0,828	12,74	0,706	13,51	0,794
15:50	12,99	0,734	13,57	0,801	12,56	0,686	13,41	0,782
15:55	12,93	0,727	13,57	0,801	12,45	0,674	13,38	0,778



Продолжение таблицы 4

16:00	12,65	0,696	13,46	0,788	12,49	0,678	13,44	0,785
16:05	12,88	0,721	13,73	0,82	12,33	0,661	13,46	0,788
16:10	12,61	0,691	13,57	0,801	12,4	0,669	13,54	0,797
16:15	12,57	0,687	13,62	0,807	12,17	0,644	13,44	0,785
16:20	12,17	0,644	13,48	0,79	12,01	0,627	13,43	0,784
16:25	12,17	0,644	13,51	0,794	11,98	0,624	13,54	0,797
16:30	12,57	0,687	13,88	0,838	11,77	0,602	13,46	0,788
16:35	12,00	0,626	13,57	0,801	11,64	0,589	13,49	0,791
16:40	10,89	0,516	12,96	0,73	11,37	0,562	13,44	0,785
16:45	11,93	0,619	13,59	0,803	11,27	0,552	13,48	0,79
16:50	11,98	0,624	13,78	0,826	11,11	0,537	13,48	0,79
16:55	11,92	0,618	13,8	0,828	10,77	0,504	13,33	0,773
17:00	11,38	0,563	13,8	0,828	10,37	0,468	13,28	0,767
17:05	10,18	0,451	13,12	0,748	10,28	0,459	13,33	0,773
17:10	11,03	0,529	13,89	0,839	10,05	0,439	13,49	0,791
17:15	10,87	0,514	13,67	0,812	9,76	0,414	13,38	0,778
17:20	10,56	0,485	13,65	0,81	9,36	0,381	13,36	0,776
17:25	10,40	0,47	13,62	0,807	8,75	0,333	13,25	0,763
17:30	10,15	0,448	13,76	0,823	8,38	0,305	13,3	0,769
17:35	9,78	0,416	13,65	0,81	8,2	0,292	13,25	0,763
17:40	9,54	0,396	13,72	0,818	7,53	0,247	13,2	0,758
17:45	9,09	0,359	13,59	0,803	7,04	0,215	13,11	0,747
17:50	8,86	0,341	13,59	0,803	6,58	0,188	12,96	0,73
17:55	7,85	0,268	13,31	0,77	6,3	0,173	12,98	0,733
18:00	6,05	0,159	13,22	0,76	5,87	0,15	12,99	0,734
18:05	6,50	0,184	13,52	0,795	5,66	0,139	12,88	0,721
18:10	5,90	0,151	13,44	0,785	5,45	0,129	12,83	0,716
18:15	5,72	0,142	13,35	0,775	5,21	0,118	12,62	0,692
18:20	5,27	0,121	13,28	0,767	3,99	0,069	12,45	0,674
18:25	4,44	0,086	13,17	0,754	3,88	0,065	12,25	0,652
18:30	3,99	0,069	13,09	0,745	3,73	0,06	12,08	0,634
18:35	2,59	0,029	11,92	0,618	3,63	0,057	11,88	0,614
18:40	3,04	0,04	13,14	0,751	3,47	0,052	11,56	0,581
18:45	2,52	0,028	12,49	0,678	3,01	0,039	11,38	0,563
18:50	2,43	0,026	12,74	0,706	2,83	0,035	11,06	0,532
18:55	2,27	0,022	12,57	0,687	2,59	0,029	10,55	0,484
19:00	2,06	0,018	12,24	0,651	2,36	0,024	10,11	0,444
19:05	1,82	0,014	11,69	0,594	2,14	0,02	9,58	0,399
19:10	1,59	0,011	11,32	0,557	1,85	0,015	8,8	0,337
19:15	1,27	0,007	9,42	0,386	1,56	0,011	7,72	0,259
19:20	1,17	0,006	9,1	0,36	1,25	0,007	6,24	0,169
19:25	1,01	0,004	8,51	0,315	1	0,004	4,82	0,101
19:30	0	0	0	0	0	0	0	0

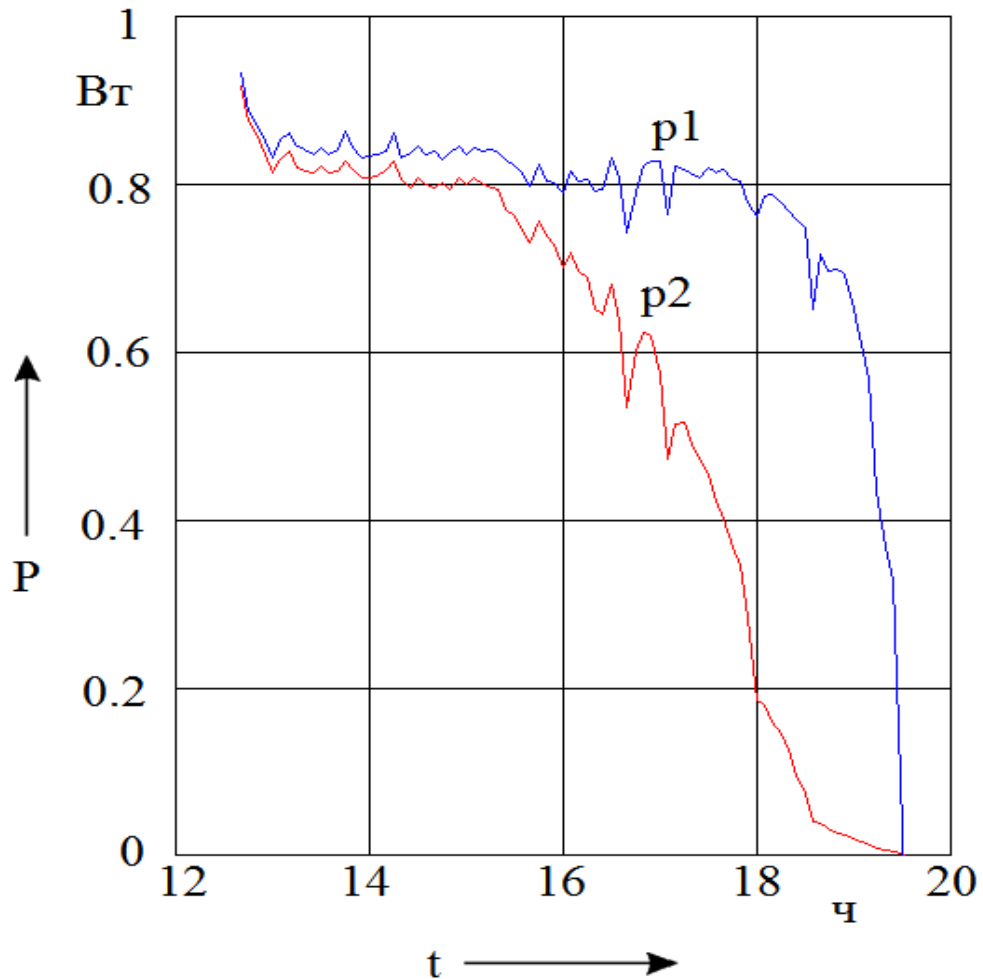


Рисунок 18 – Эксперимент с наклонной осью вращения

Рассчитаем значение площадей под кривыми для нахождения выработки энергии за весь день. Для этого возьмем определенный интеграл, границы которого будут интервалом времени проведения эксперимента, а функциями – найденные зависимости. Более подробный расчёт находится в приложении Б

Найдем выработки энергии в первый день и сравним их между собой, где  $P_1$  – выработка при использовании трекера с наклонной осью вращения,  $P_2$  – выработка при стационарной установке СБ:

$$\frac{P_1}{P_2} = \frac{\int_{12.667}^{19.5} P_1(t) dt}{\int_{12.667}^{19.5} P_2(t) dt} = \frac{5.342 \text{ Вт} \cdot \text{ч}}{3.821 \text{ Вт} \cdot \text{ч}} = 1.398$$

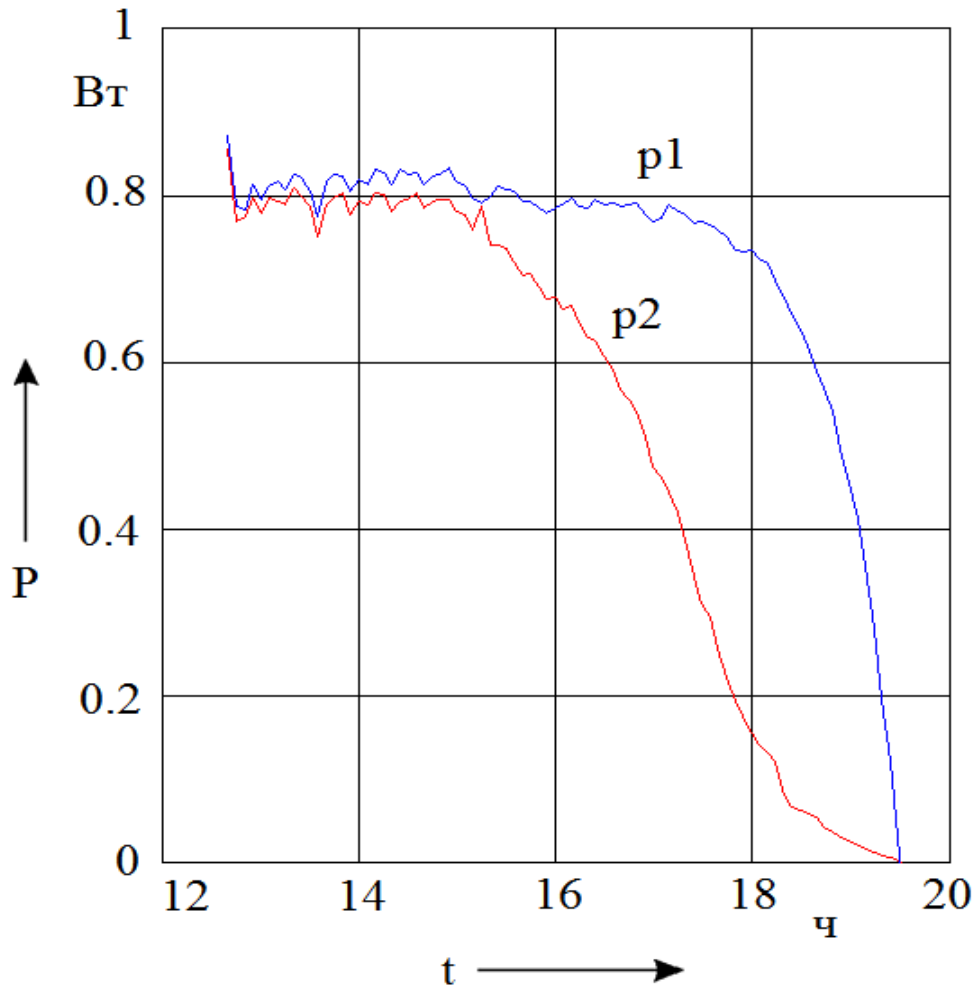


Рисунок 19 – Эксперимент с вертикальной осью вращения

Найдем выработки энергии во второй день и сравним их между собой, где  $P_1$  – выработка при использовании трекера с вертикальной осью вращения,  $P_2$  – выработка при стационарной установке СБ:

$$\frac{P_1}{P_2} = \frac{\int_{12.667}^{19.5} P_1(t) dt}{\int_{12.667}^{19.5} P_2(t) dt} = \frac{4.989 \text{ Вт} \cdot \text{ч}}{3.554 \text{ Вт} \cdot \text{ч}} = 1.404$$

В результате мы видим, что использование солнечного трекера даёт прирост в выработке до 40%. Интересно то, что прибавка в выработке практически не зависит от того, какую ось вращения мы выбрали.

## Заключение

В результате выполнения бакалаврской работы был разработан макет одноосевого солнечного трекера, исполнительным устройством которого является шаговый двигатель. Были поставлены задачи, поочередное выполнение которых помогло в достижении основной цели работы.

В первой части работы была рассмотрена основная концепция применения солнечных трекеров в гелиосистемах. Были рассмотрены основное устройство трекеров, их типы и виды, а также способы управления системой ориентации.

Во второй части производилась разработка электрической принципиальной схемы устройства, была создана блок-схема, которая помогла понять из какого минимального набора элементов должен состоять солнечный трекер. Производился выбор элементов.

В третьей части работы описывается конструктив готового устройства. Благодаря применению безопасной монтажной платы процесс создания и отладки устройства происходил наиболее рациональным, быстрым и удобным способом.

В четвертой части описывается реализация программного управления работы трекера. Была создана программа и блок-схема алгоритма, которая даёт представление о работе программы.

В последней части работы проводились экспериментальные исследования с применением разработанного солнечного трекера. Было произведено снятие вольт-амперной характеристики солнечной батареи, а также проведены эксперименты по сравнению энергетической выработки при использовании солнечного трекера с наклонной и вертикальной осями вращения по сравнению со стационарной установкой солнечной батареи.

Таким образом, был создан макет устройства, которое производит поиск положения максимальной освещенности.

Стоит отметить, что вне зависимости от выбранной оси вращения, будь то вертикальная или наклонная, в результате проведения экспериментов удалось установить, что прирост энергии с использованием солнечного трекера находится, как минимум, на уровне 40% по сравнению со стационарным использованием солнечных модулей.

Полученные результаты не учитывают затраты энергии на использование двигателей для вращения солнечных батарей или их комплекса. Однако, грамотное применение солнечных трекеров на больших полях фотопанелей, по сравнению с частным использованием в небольших количествах, говорит об их неоспоримом преимуществе.

## Список используемой литературы

- 1 С. Гибилиско, Альтернативная энергетика без тайн, Москва, 2010. – 368с.
- 2 Глиberman А. Я. - Кремниевые солнечные батареи, Госэнергоиздат, 1961. – 74с.
- 3 Mukund R. Patel, Ветровые и солнечные энергетические установки. Проектирование, Анализ и Эксплуатация, 2005. – 472с. // ISBN: 978-0849315701.
- 4 Умаров Г. Я., Ершов А. А., Солнечная энергетика, М., Знание, 1974.- 64 стр.
- 5 Г. Шехер, Экономические основы солнечной энергетика. Экологический возобновляемый источник энергии будущего, 2004. – 368с. // ISBN: 978-1844070756.
- 6 А. В. Наумов - Ещё раз о развитии солнечной энергетика и рынке кремниевого сырья в 2007-2010 гг, 2007. – 20с.
- 7 В. А. Андреев, В. А. Грилихес, В. Д. Румянцев, Фотоэлектрическое преобразование концентрированного солнечного излучения, Наука, 1989. – 310с.
- 8 Без автора. Солнечный коллектор, пособие для проектирования, Будапешт: GB-GANZ. – 32 с.
- 9 Antonio L. Luque, Antonio L. Luque, Viacheslav M. Andreev, Concentrator photovoltaics, Springer-verlag Berlin Heidelberg, 2007. – 345с. ISBN 978-3-540-68796-2.
- 10 Ignacio Luque-Heredia et al., "The Sun Tracker in Concentrator Photovoltaics" in Cristobal, A.B.,Martí, A.,and Luque, A. *Next Generation Photovoltaics*, Springer Verlag, 2012. – 332с. ISBN 978-3642233692.
- 11 Stuart A. Boden, Darren M. Bagnall, Bio-mimetic nanostructured surfaces for near-zero reflection sunrise to sunset, University of Southampton, retrieved 5-June-2011.

- 12 William David Lubitz, "Effect of Manual Tilt Adjustments on Incident Irradiance on Fixed and Tracking Solar Panels", *Applied Energy*, Volume 88 (2011), pp. 1710-1719.
- 13 David Cooke, "Single vs. Dual Axis Solar Tracking", *Alternate Energy eMagazine*, April 2011.
- 14 Ю. Студёнов, Солнечные трекары: [Электронный ресурс]. // URL: <http://ust.su/solar/media/section-inner79/3032/>. (Дата обращения: 29.04.2016).
- 15 Romy Kansal, PIC Based Automatic Solar Radiation Tracker, THAPAR UNIVERSITY, June 2008. – 80с.
- 16 Mr. Vishal Bhote, Prof. Jaikaran Singh, Implementation of dual axis solar tracker model by using microcontroller, *International Journal of Engineering Research and General Science* Volume 2, Issue 4, June-July, 2014. ISSN 2091-2730. – с. 780 – 784.
- 17 Улли Соммер, Программирование микроконтроллерных плат Arduino/Freeduino, БХВ-Петербург, 2012. –с. 238.
- 18 Александров, А.А Электротехнические чертежи и схемы / Александров К.К., Кузьмина Е.Г.- М.:Энергоатомиздат, 1990. - 288с.
- 19 Стивен Прата, Язык программирования C++. Лекции и упражнения, 6-е издание // Вильямс, 2012. –с. 1244.
- 20 ГОСТ 19.701-90. Единая система программной документации. Схемы алгоритмов, программ, данных и систем. - Введ. 1992-01-01. - М.: Госстандарт РФ: Изд-во стандартов, 1990.- 23с.: ил.

## Приложение А

```
#include <AccelStepper.h> // Подключение библиотеки управления шаговым
двигателем

#define HALFSTEP 8 //Включение полушагового режима работы двигателя

// Определение пинов для управления двигателем
#define motorPin1 4 // Номер порта на плате Arduino подключаемый к порту
IN1 на драйвере ULN2003
#define motorPin2 5 // Номер порта на плате Arduino подключаемый к порту
IN2 на драйвере ULN2003
#define motorPin3 6 // Номер порта на плате Arduino подключаемый к порту
IN3 на драйвере ULN2003
#define motorPin4 7 // Номер порта на плате Arduino подключаемый к порту
IN4 на драйвере ULN2003
int val = 0; //Переменная для значение АЦП порта A0
unsigned long time; // Переменная для хранения времени отсчёта
unsigned long stop; // Переменная для остановки и перезапуска таймера
int flag_1 = 1;
int flag_2 = 0;
int flag_3 = 0;
int flag_4 = 0;
int flag_5 = 0; // Переменные состояния
int BestX; // Переменная для хранения лучшего положения вала по значению
выработки
long Volt_prev = 0; // Переменная для хранения значения напряжения с
делителя напряжения (порта A5)
int BestX2; // Переменная для хранения лучшего положения вала по значению
выработки
double Volt = 0;
double Volt2 = 0; // Переменная для хранения значения напряжения с
делителя напряжения (порта A5)
AccelStepper stepper1(HALFSTEP, motorPin1, motorPin3, motorPin2,
motorPin4); // Инициализация с последовательностью выводов IN1-IN3-IN2-
IN4
// для использования библиотеки AccelStepper с двигателем 28BYJ-48

void setup() //Стартовые установки
{
  stepper1.setMaxSpeed(500.0); // Задаем начальную скорость вращения вала
двигателя
```



```

    stepper1.setAcceleration(10000.0); // Задаем темп разгона/торможения
двигателя
    Serial.begin(9600);
}

void loop() //Основной цикл
{ if (flag_1==1) //состояние 1
  {
    stepper1.runToNewPosition(256); //Движение на 256 шагов по часовой
стрелке
    flag_1=0;
    flag_2=1;
  }

  if (flag_2==1) //состояние 2
  {
    stepper1.moveTo(-2048); //поиск нулевого положения, движение на 2048
против часовой стрелки
    flag_2=0;
    flag_3=1;
  }

  time = millis(); //запуск таймера
  val = analogRead(A0); //считываем значение с потенциометра и заносим в
переменную val

  if (val > 900 && flag_3 == 1) //Условие остановки двигателя в нулевом
положении
  {
    stepper1.stop(); //Остановка двигателя
    stepper1.setCurrentPosition(0); //Принимаем точку остановки - начальной
точкой отсчёта
    flag_3 = 0;
    flag_4 = 1; //
  }

  if (flag_4 == 1) //Состояние 4 - поиск максимума
  {
    double K = 5.65; //угол поворота в цикле поиска наилучшей выработки
батареи (вращение по 0.5 градуса)
    for (double X = 1; X <= 2048; X = X + K) //цикл поиска максимума,
движение по часовой на 180 градусов
    {

```

```

stepper1.runToNewPosition(X); //задаем двигателю вращаться по 0.5
градуса
delayMicroseconds(900); // задержка перед считыванием значения АЦП
Volt_prev = analogRead(A5); //считываем значение из АЦП

if (Volt_prev > Volt)
{
    Volt = Volt_prev; //записываем напряжение, если значение на
предыдущем шаге было меньше
    BestX = X; //данное положение записываем как наилучшее (записываем
шаг относительно нуля)
}

if (X>1022 && X<1026) //считываем значение напряжение, если вал в
срединном положении
{
    Volt2=Volt_prev*0.00402*4; //преобразуем значение из АЦП в
напряжение в вольтах
    Serial.print("Volt=");
    Serial.println(Volt2); // выводим значение напряжение в среднем
положении на экран
}

}
flag_4 = 0;
flag_5 = 1;
}

if (flag_5 == 1) //состояние 5
{
    Volt=Volt*0.00402*4; //преобразуем значение из АЦП в напряжение в
вольтах
    Serial.print("Best_Volt=");
    Serial.println(Volt); //выводим значение напряжения в наилучшем
положении на экран
    stepper1.runToNewPosition(BestX); //выставляем вал двигателя в наилучшее
положение
    flag_5 = 0;
}

stepper1.run(); //Запуск вращения вала

```

```
if((time-stop)>300000) //Запускаем процесс поиска заного, если прошло 5
минут
{
  stop=stop+300000;
  stepper1.setCurrentPosition(0);
  BestX=0;
  Volt=0;
  Volt2=0; // сбрасываем все записанные значения
  flag_1 = 1;
}
}
```

## Приложение Б

### Обработка ВАХ солнечной панели в MathCad 15

#### Нагрузка панели на различные сопротивления

- 1 - Пасмурно 1
- 2 - Пасмурно 2
- 3 - Галогеновая лампа 150 В т
- 4 - Галогеновая лампа 1000 В т
- 5 - Панель перпендикулярна к солнцу
- 6 - Между солнцем и панелью 60 градусов
- 7 - Панель перпендикулярна к солнцу и за стеклом
- 8 - Между солнцем и панелью 60 градусов и за стеклом

$$\begin{aligned} \text{mA} &:= 10^{-3} \\ \text{mWt} &:= 10^{-3} \end{aligned}$$

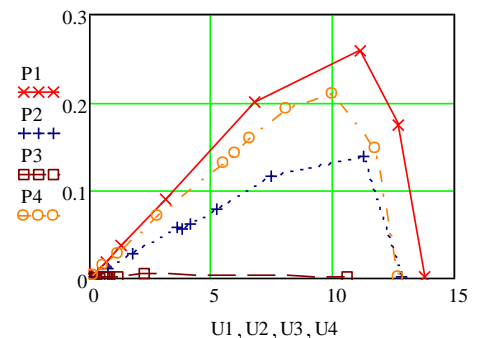
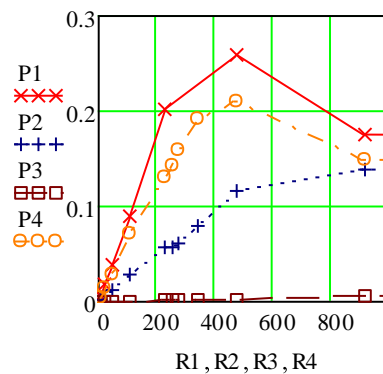
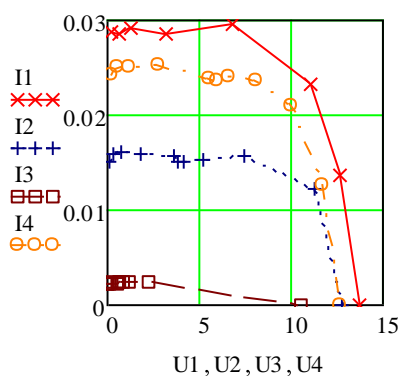
$$\begin{aligned}
 \text{UI1} &:= \begin{pmatrix} 0.19 & 0.028788 \\ 0.65 & 0.028634 \\ 1.3 & 0.029083 \\ 3.15 & 0.028533 \\ 6.8 & 0.029565 \\ 11.1 & 0.02327 \\ 12.7 & 0.013774 \\ 13.75 & 0.1\text{mA} \end{pmatrix} &
 \text{UI2} &:= \begin{pmatrix} 0.1 & 0.015152 \\ 0.36 & 0.015859 \\ 0.72 & 0.016107 \\ 1.76 & 0.015942 \\ 3.63 & 0.015783 \\ 3.8 & 0.015038 \\ 4.13 & 0.015035 \\ 5.2 & 0.015276 \\ 7.45 & 0.015618 \\ 11.3 & 0.012256 \\ 12.8 & 0.1\text{mA} \end{pmatrix} &
 \text{UI3} &:= \begin{pmatrix} 0.015 & 0.002273 \\ 0.05 & 0.002203 \\ 0.1 & 0.002237 \\ 0.26 & 0.002355 \\ 0.53 & 0.002304 \\ 0.61 & 0.002414 \\ 0.67 & 0.002439 \\ 0.83 & 0.002438 \\ 1.12 & 0.002348 \\ 2.25 & 0.00244 \\ 10.57 & 0.1\text{mA} \end{pmatrix} &
 \text{UI4} &:= \begin{pmatrix} 0.16 & 0.024242 \\ 0.57 & 0.02511 \\ 1.12 & 0.025056 \\ 2.79 & 0.025272 \\ 5.5 & 0.023913 \\ 6 & 0.023744 \\ 6.6 & 0.024026 \\ 8.09 & 0.023766 \\ 10 & 0.020964 \\ 11.72 & 0.012711 \\ 12.7 & 0.1\text{mA} \end{pmatrix}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{U1} &:= \text{UI1}^{(0)} & \text{U2} &:= \text{UI2}^{(0)} \\
 \text{I1} &:= \text{UI1}^{(1)} & \text{I2} &:= \text{UI2}^{(1)} \\
 \text{P1} &:= \overrightarrow{\text{U1} \cdot \text{I1}} \\
 \text{R1} &:= \frac{\text{U1}}{\text{I1}}
 \end{aligned}$$

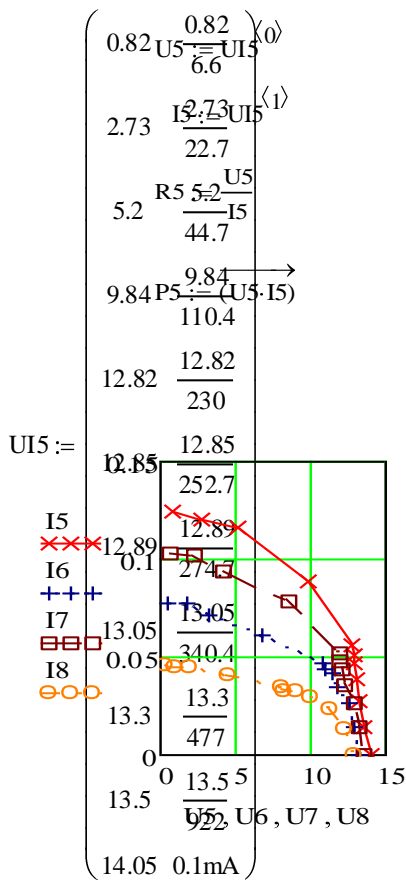
$$\begin{aligned}
 \text{P2} &:= \overrightarrow{\text{U2} \cdot \text{I2}} \\
 \text{R2} &:= \frac{\text{U2}}{\text{I2}}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{U3} &:= \text{UI3}^{(0)} \\
 \text{R3} &:= \frac{\text{U3}}{\text{I3}}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{U4} &:= \text{UI4}^{(0)} \\
 \text{I4} &:= \text{UI4}^{(1)} \\
 \text{P4} &:= \overrightarrow{\text{U4} \cdot \text{I4}} \\
 \text{R4} &:= \frac{\text{U4}}{\text{I4}} \\
 \text{I3} &:= \text{UI3}^{(1)} \\
 \text{P3} &:= \overrightarrow{\text{U3} \cdot \text{I3}}
 \end{aligned}$$



UI6 :=	0.51 $\frac{0.51}{6.6}$	UI7 :=	0.68 $\frac{0.68}{6.6}$	UI8 :=	0.3 $\frac{0.3}{6.6}$
	1.75 $\frac{1.75}{22.7}$		2.32 $\frac{2.32}{22.7}$		1.03 $\frac{1.03}{22.7}$
	3.18 $\frac{3.18}{44.7}$		4.2 $\frac{4.2}{44.7}$		2.01 $\frac{2.01}{44.7}$
	6.74 $\frac{6.74}{110.4}$		8.62 $\frac{8.62}{110.4}$		4.5 $\frac{4.5}{110.4}$
	10.8 $\frac{10.8}{230}$		11.95 $\frac{11.95}{230}$		8 $\frac{8}{230}$
	11.02 $\frac{11.02}{252.7}$		12 $\frac{12}{252.7}$		8.25 $\frac{8.25}{252.7}$
	11.45 $\frac{11.45}{274.7}$		12.14 $\frac{12.14}{274.7}$		9.1 $\frac{9.1}{274.7}$
	11.8 $\frac{11.8}{340.4}$		12.26 $\frac{12.26}{340.4}$		10.08 $\frac{10.08}{340.4}$
	12.63 $\frac{12.63}{477}$		12.85 $\frac{12.85}{477}$		11.23 $\frac{11.23}{477}$
	12.83 $\frac{12.83}{922}$		13.27 $\frac{13.27}{922}$		12.2 $\frac{12.2}{922}$
	13.27    0.1mA		13.57    0.1mA		12.94    0.1mA

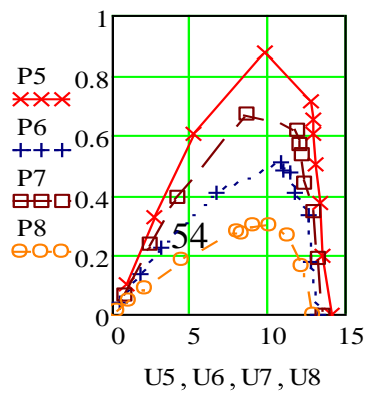
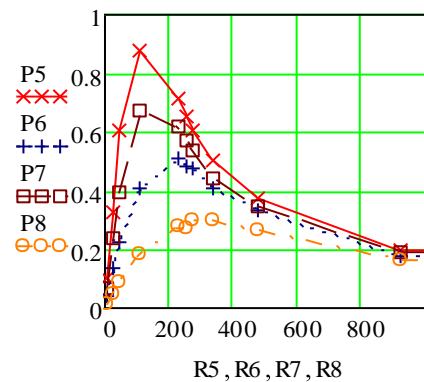


$$U_6 := UI_6^{(0)} \quad U_7 := UI_7^{(0)} \quad U_8 := UI_8^{(0)}$$

$$I_6 := UI_6^{(1)} \quad I_7 := UI_7^{(1)} \quad I_8 := UI_8^{(1)}$$

$$R_6 := \frac{U_6}{I_6} \quad R_7 := \frac{U_7}{I_7} \quad R_8 := \frac{U_8}{I_8}$$

$$P_6 := (U_6 \cdot I_6) \quad P_7 := (U_7 \cdot I_7)$$



$$P_8 := (U_8 \cdot I_8)$$

$$U_{xx} := 14 \quad I_{kz} := 0.124$$

Регрессия общего вида

$$U1 := UI5^{(0)} \quad I1 := UI5^{(1)} \cdot 1000 \quad u1 := 0, 0.1.. \max(U1) \quad \begin{pmatrix} 0 \\ K1 := 0 \\ 0 \end{pmatrix}$$

$$f1(u1, K1) := K1_0 + K1_1 \cdot e^{u1} + K1_2 \cdot u1^2$$

$$d2(K1) := \sum (I1 - f1(U1, K1))^2$$

$$K1 := \text{Minimize}(d2, K1)$$

$$d2(K1) = 248.448$$

$$K1 = \begin{pmatrix} 124.699 \\ -4.623 \times 10^{-5} \\ -0.363 \end{pmatrix}$$

$$U2 := UI6^{(0)} \quad I2 := UI6^{(1)} \cdot 1000 \quad u2 := 0, 0.1.. \max(U2) \quad \begin{pmatrix} 0 \\ K2 := 0 \\ 0 \end{pmatrix}$$

$$f2(u2, K2) := K2_0 + K2_1 \cdot e^{u2} + K2_2 \cdot u2^2$$

$$d2(K2) := \sum (I2 - f2(U2, K2))^2$$

$$K2 := \text{Minimize}(d2, K2)$$

$$d2(K2) = 68.162$$

$$K2 = \begin{pmatrix} 75.297 \\ -5.99 \times 10^{-5} \\ -0.224 \end{pmatrix}$$

$$U3 := UI7^{(0)} \quad I3 := UI7^{(1)} \cdot 1000 \quad u3 := 0, 0.1.. \max(U3) \quad \begin{pmatrix} 0 \\ K3 := 0 \\ 0 \end{pmatrix}$$

$$f3(u3, K3) := K3_0 + K3_1 \cdot e^{u3} + K3_2 \cdot u3^2$$

$$d2(K3) := \sum (I3 - f3(U3, K3))^2$$

$$K3 := \text{Minimize}(d2, K3)$$

$$d2(K3) = 68.056$$

$$K3 = \begin{pmatrix} 102.505 \\ -5.371 \times 10^{-5} \\ -0.329 \end{pmatrix}$$

$$U4 := UI8^{(0)} \quad I4 := UI8^{(1)} \cdot 1000 \quad u4 := 0, 0.1.. \max(U4) \quad \begin{pmatrix} 0 \\ K4 := 0 \\ 0 \end{pmatrix}$$

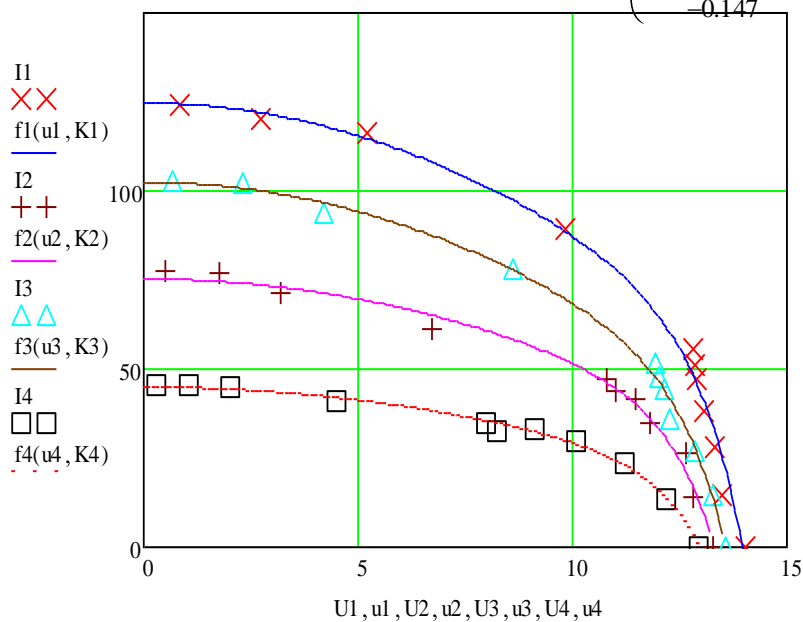
$$f4(u4, K4) := K4_0 + K4_1 \cdot e^{u4} + K4_2 \cdot u4^2$$

$$d2(K4) := \sum (I4 - f4(U4, K4))^2$$

$$K4 := \text{Minimize}(d2, K4)$$

$$d2(K4) = 9.112$$

$$K4 = \begin{pmatrix} 44.926 \\ -4.832 \times 10^{-5} \\ -0.147 \end{pmatrix}$$

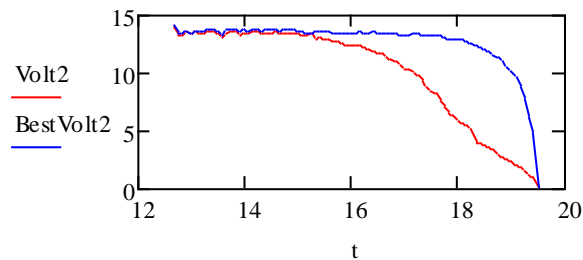
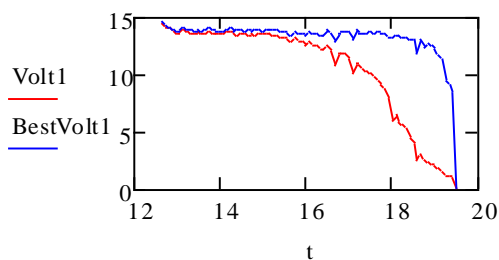


### 1) Наклонная ось

стац.		трекер	
	0		0
	0	14.52	14.65
	1	14.18	14.28
	2	14.07	14.17
	3	13.86	13.99
	4	13.67	13.83
	5	13.81	14.01
	6	13.89	14.07
Volt1 =	7	13.72	13.94
	8	13.7	13.91
	9	13.68	13.86
	10	13.75	13.93
	11	13.68	13.86
	12	13.7	13.91
	13	13.8	14.09
	14	13.7	13.91
	15	...	...

### 2) Вертикальная ось

стац.		трекер	
	0		0
	0	14.02	14.15
	1	13.3	13.44
	2	13.35	13.41
	3	13.54	13.68
	4	13.38	13.51
	5	13.54	13.65
	6	13.49	13.7
Volt2 =	7	13.46	13.62
	8	13.64	13.78
	9	13.54	13.73
	10	13.44	13.59
	11	13.12	13.33
	12	13.48	13.72
	13	13.54	13.78
	14	13.59	13.75
	15	...	...



### Находим мощность

$$Vatt1 := \frac{Volt1^2}{230} \quad BestVatt1 := \frac{BestVolt1^2}{230}$$

$$x := 12.667, 12.75.. 19.6$$

$$Vatt2 := \frac{Volt2^2}{230} \quad BestVatt2 := \frac{BestVolt2^2}{230}$$

### линейно интерполируем

$$Vatt1int(x) := \text{linterp}(t, Vatt1, x)$$

$$Vatt2int(x) := \text{linterp}(t, Vatt2, x)$$

$$BestVatt1int(x) := \text{linterp}(t, BestVatt1, x)$$

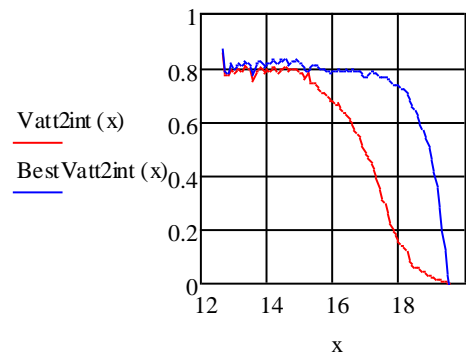
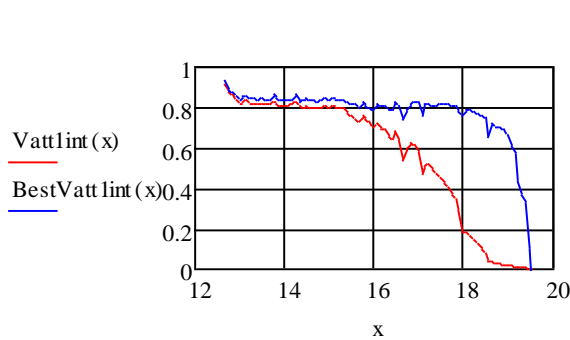
$$BestVatt2int(x) := \text{linterp}(t, BestVatt2, x)$$

### находим отношение выработок

$$\frac{\int_{12.667}^{19.4974} BestVatt2int(x) dx}{\int_{12.667}^{19.4974} Vatt2int(x) dx} = 1.404$$

При наклонной оси выработка больше в 1.398 раз, при вертикальной оси в 1.404 раз

$$\frac{\int_{12.667}^{19.4974} BestVatt1int(x) dx}{\int_{12.667}^{19.4974} Vatt1int(x) dx} = 1.398$$



расчёт выработки другим способом

**В В а т т \*ч**

```
Vatt1 := Mass ← Vatt1 · 5 / 60 = 3.861
Sum ← 0
for i ∈ 0..82
  Sum ← Sum + Massi
return Sum
```

```
BestVatt1 := Mass ← BestVatt1 · 5 / 60 = 5.383
Sum ← 0
for i ∈ 0..82
  Sum ← Sum + Massi
return Sum
```

```
Vatt2 := Mass ← Vatt2 · 5 / 60 = 3.597
Sum ← 0
for i ∈ 0..82
  Sum ← Sum + Massi
return Sum
```

```
BestVatt2 := Mass ← BestVatt2 · 5 / 60 = 5.027
Sum ← 0
for i ∈ 0..82
  Sum ← Sum + Massi
return Sum
```

**В Д ж**

$$Vatt1dj := Vatt1 \cdot 3600 = 1.39 \times 10^4$$

$$BestVatt1dj := BestVatt1 \cdot 3600 = 1.938 \times 10^4$$

$$Vatt2dj := Vatt2 \cdot 3600 = 1.295 \times 10^4$$

$$BestVatt2dj := BestVatt2 \cdot 3600 = 1.81 \times 10^4$$

общая рабочая площадь панели  $S := \frac{14 \cdot 14}{10000} = 0.02 \text{ м}^2$

И тогда для  $1 \text{ м}^2$  полученная выработка равняется

**В В а т т \*ч**

$$Vatt1vir := \frac{Vatt1}{S} = 197.002 \quad BestVatt1vir := \frac{BestVatt1}{S} = 274.651$$

$$Vatt2vir := \frac{Vatt2}{S} = 183.5 \quad BestVatt2vir := \frac{BestVatt2}{S} = 256.486$$