

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН

Некоммерческое акционерное общество «Казахский национальный исследовательский
технический университет имени К.И.Сатпаева»



Институт автоматизации и информационных технологий

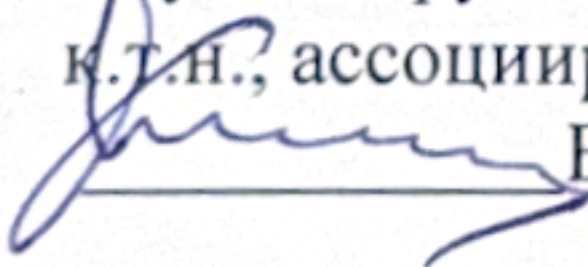
УДК 665.622.43.046.6-52 (043) На правах рукописи

Тугелбай Айбек Бекулы

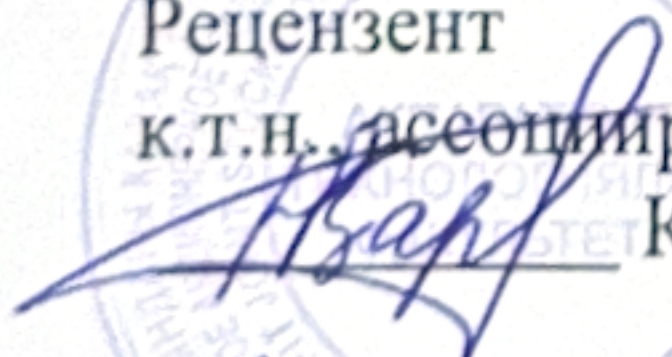
МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ (ПРОЕКТ)
На соискание академической степени магистра

Название диссертации: «Разработка и испытание механизма автоматического
регулирования наклона солнечной панели в соответствии с
движением солнца »

Направление подготовки: 7M07107 – Робототехника и мехатроника

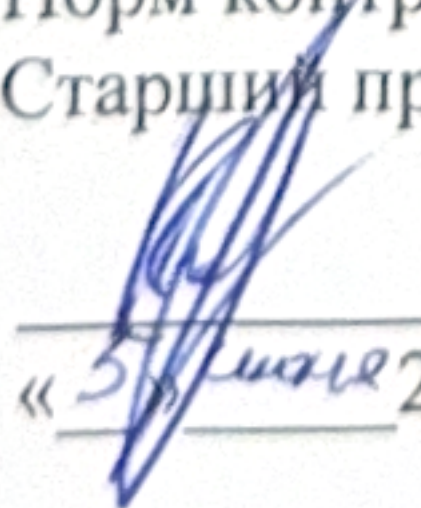
Научный руководитель
к.т.н., ассоциированный профессор
 Бактыбаев М.К.

«4» июля 2025 г.

Рецензент
к.т.н., ассоциированный профессор
 Карымсакова Н.Т.

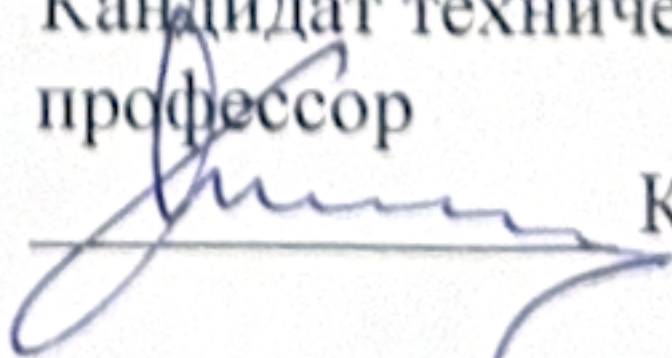
«4» июля 2025 г.

Норм контроль
Старший преподаватель

 Кальменов Е.Т.
«5» июля 2025 г.

ДОПУЩЕН К ЗАЩИТЕ

Заведующий кафедрой РТиТСА
Кандидат технических наук,
профессор

 К.А. Ожикенов
«10» июля 2025 г.

Алматы 2025

Некоммерческое акционерное общество «Казахский национальный исследовательский
технический университет имени К.И.Сатпаева»



SATBAYEV
UNIVERSITY

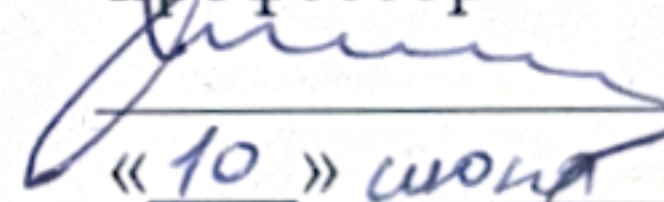
Институт автоматизации и информационных технологий

Кафедра Робототехники и технических средств автоматизации

7M07107 – Робототехника и мехатроника

УТВЕРЖДАЮ

Заведующий кафедрой РТиТСА
Кандидат технических наук,
профессор

 К.А. Ожикенов
«10» июня 2025 г.

ЗАДАНИЕ

на выполнение дипломного проекта

Магистранту Тугелбай Айбеку Бекулы

Тема: Разработка и испытание механизма автоматического регулирования наклона
солнечной панели в соответствии с движением солнца

Утверждена приказом № ____ от «____» _____

Срок сдачи законченной диссертации : «____» май 2025 г.

Исходные данные к магистерской диссертации:

Перечень подлежащих разработке в магистерской диссертации вопросов:

- а) Изучить существующие технологии и конструкции систем автоматического слежения за солнцем для солнечных панелей,.
 - б) Разработать упрощённую и надёжную конструкцию механизма автоматического регулирования наклона солнечной панели с учётом погодных условий
 - в) Подобрать необходимые компоненты системы и разработать схему электрических соединений устройства.
 - г) Собрать макет устройства, провести испытания в различных условиях освещённости
- Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей):

Рекомендуемая основная литература: 40 источников из списка

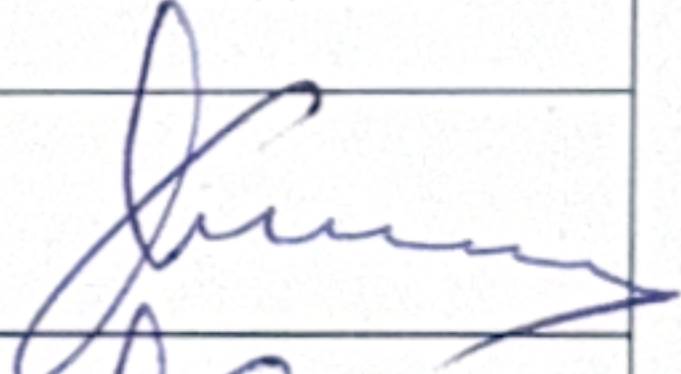
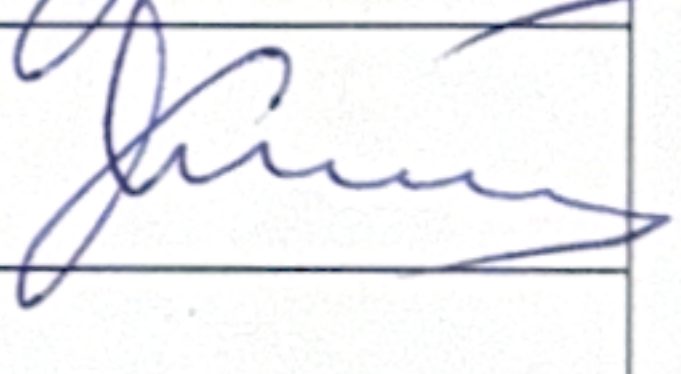
Продолжение приложения

И ГРАФИК подготовки магистерской диссертации

Наименование разделов, перечень разрабатываемых вопросов	Сроки представления научному руководителю	Примечание
Провести анализ существующих систем ориентации солнечных панелей	28.05.2024	Выполнено
Разработать конструкцию механизма автоматической регулировки наклона.	13.10.2024	Выполнено
Подобрать компоненты и составить схему работы устройства.	07.03.25	Выполнено
Провести экспериментальные испытания макета и оценить полученные результаты	08.05.25	Выполнено

Подписи

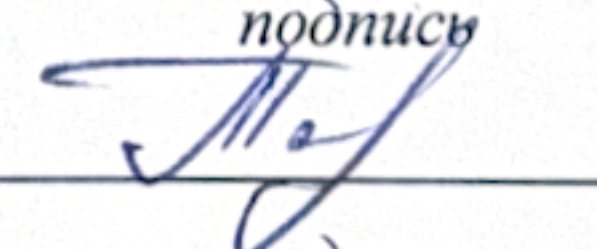
консультантов и норм контролера на законченную магистерскую диссертацию с указанием относящихся к ним разделов диссертации

Наименования разделов	Консультанты, И.О.Ф. (уч. степень, звание)	Дата подписания	Подпись
Экономическая часть	Бактыбаев М.К.	04.06.25	
Охрана труда	Бактыбаев М.К.	04.06.25	
Норм контролер	Старший преподаватель Кальменов Е. Т.	05.06.25	

Научный руководитель

Задание принял к исполнению обучающийся

Дата

подпись

подпись

Бактыбаев М.К.

Ф.И.О.

Тугелбай А.Б.

Ф.И.О.

«___» _____ 2025 г

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ
КАЗАХСТАН

Некоммерческое акционерное общество «Казахский национальный исследовательский
технический университет имени К.И.Сатпаева»

ОТЗЫВ

НАУЧНОГО РУКОВОДИТЕЛЯ

на магистерскую диссертацию

магистранту специальности 7М07107 – Робототехника и мехатроника

Тугелбай Айбек Бекулы

Тема: «Разработка и испытание механизма автоматического регулирования наклона
солнечной панели в соответствии с движением солнца »

В условиях глобального энергетического перехода и растущей стоимости энергоресурсов, максимизация эффективности каждого элемента возобновляемой генерации становится ключевой задачей. Данная работа находится на переднем крае этого тренда, предлагая решение для повышения производительности солнечных панелей — одной из самых доступных технологий декарбонизации. Актуальность исследования продиктована острой потребностью в бюджетных и надежных системах слежения (трекерах), способных сделать солнечную энергетику экономически выгодной не только для крупных станций, но и для частного сектора и малого бизнеса.

Автор не просто проанализировал существующие решения, но выявил их фундаментальный недостаток — технологический и экономический разрыв между примитивными статичными креплениями и дорогостоящими промышленными трекерами. В ответ была предложена оригинальная инженерная концепция, воплощенная в действующем прототипе. Особого внимания заслуживает глубина практической проработки: проведены всесторонние полевые испытания, по результатам которых верифицированы ключевые эксплуатационные характеристики, включая угловую погрешность слежения и, что самое важное, чистый энергетический выигрыш системы.

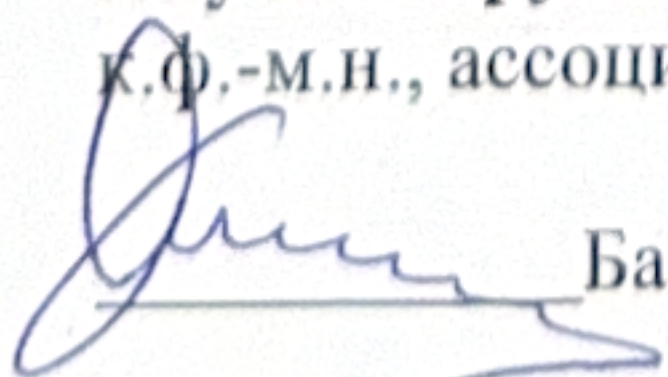
Проект демонстрирует комплексный, междисциплинарный подход. Автор проявил высокий уровень компетенций на всех этапах: от схемотехники и программирования микроконтроллеров до 3D-моделирования и прочностных расчетов механической части.

Структура работы полностью соответствует канонам научного исследования и логично ведет от постановки проблемы к проверке гипотезы и формулировке выводов. Результаты доказывают не только работоспособность предложенной конструкции, но и её экономическую целесообразность, что открывает перспективы для её применения в агросекторе, частных домохозяйствах и для питания автономной инфраструктуры.

Считаю, что данная научно-исследовательская работа является своевременным и значимым вкладом в развитие малой распределенной энергетики, в полной мере отвечает требованиям, предъявляемым к магистерским диссертациям, и заслуживает оценки отлично а её автор, без сомнения, может быть рекомендован к защите.

Научный руководитель

К.Ф.-М.Н., ассоциированный профессор



Бактыбаев М.К.

НЕКОММЕРЧЕСКОЕ АКЦИОНЕРНОЕ ОБЩЕСТВО «КАЗАХСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ
ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ имени К.И. САТПАЕВА»

Студент образовательной программы 7M07107 – «Робототехника и мехатроника»

Магистерская диссертация

Тугелбай Айбек Бекулы

РЕЦЕНЗИЯ

на тему: «Разработка и испытание механизма автоматического
регулирования наклона солнечной панели в соответствии с движением
солнца»

Магистерская диссертация Тугелбайа Айбека выполнена по теме
«Разработка и испытание механизма автоматического регулирования наклона
солнечной панели в соответствии с движением солнца».

В условиях роста потребности в возобновляемой энергии, повышение
эффективности солнечных панелей за счет автоматического отслеживания
положения солнца является актуальной задачей. Данная работа посвящена
разработке, созданию и испытанию экономичного механизма автоматического
регулирования наклона солнечной панели на базе микроконтроллера
STM32F103C8T6. В ходе исследования спроектирована механическая часть,
разработано программное обеспечение для STM32, реализующее алгоритм
слежения, и проведены испытания прототипа.

В целом в работе представлена важная информация, согласованная с
научным и графическим материалом в соответствии с магистерским уровнем.
Работа магистранта Тугелбай Айбек по теме «Разработка и испытание механизма
автоматического регулирования наклона солнечной панели в соответствии с
движением солнца» считаю что полностью выполнено. Оцениваю магистерскую
диссертацию на 90, и считаю что магистрант заслуживает академическую
степень магистра.

Рецензент:

КазНУ имени аль-Фараби,

и.о. доцента кафедры искусственного интеллекта
и Big Data, PhD

«___» _____ 2025 г.



Карымкасова Н.Т

АҢДАТПА

Жаңартылатын энергияға деген қажеттіліктің артуы жағдайында күн панельдерінің тиімділігін күн позициясын автоматты түрде бақылау арқылы арттыру өзекті міндет болып табылады. Бұл жұмыс STM32F103C8T6 микроконтроллері негізінде күн панелінің көлбеуін автоматты түрде реттеудің үнемді механизмін әзірлеуге, құруға және сынауға арналған. Зерттеу барысында механикалық бөлік жасалды, қадағалау алгоритмін жүзеге асыратын STM32 үшін бағдарламалық жасақтама жасалды және прототиптік сынақтар жүргізілді. Ұсынылған жүйе күн энергиясын өндіруді арттырады деп күтілуде.

АННОТАЦИЯ

Актуальной задачей данной работы является повышение эффективности солнечных панелей за счет автоматического отслеживания положения солнца в условиях роста потребности в возобновляемой энергии. Работа предлагает разработку, создание и испытание экономичного механизма автоматического регулирования наклона солнечной панели на базе микроконтроллера STM32F103C8T6. Результатом данной работы является проектировка механической части, разработка программного обеспечения для STM32, реализующее алгоритм слежения, и проведения испытания прототипа. Ожидается, что предложенная система позволит увеличить выработку энергии.

ABSTRACT

With the increasing demand for renewable energy, it has become crucial to enhance the efficiency of solar panels through the automatic tracking of the sun, and the focus of this project is to develop, develop and test a cost-effective mechanism for automatic tilt control of a solar panel with an automatic tilt control based on an STM32F103C8T6 microcontroller. The mechanical component of the research was designed, the STM32 software was developed with a tracking algorithm, and tests were conducted on the prototype. The proposed system is expected to improve energy generation.

СПИСОК СОКРАЩЕННЫХ ТЕРМИНОВ

ООН	Бірыңғай ашық коммуникация архитектурасы	Open Platform Communications Unified Architecture
ФЭ	Бағдарламаланатын логикалық контроллер	Programmable Logic Controller
ВИЭ	Заттар интернеті	Internet of Things
ПЛК	Конволюциялық нейрондық желі	Convolutional Neural Network
RTC	Высокоточные часы реального времени	Variational Autoencoder
AI	Қалған пайдалану ресурсы	Remaining Useful Life
ML	Машиналық оқыту	Machine Learning
ШИМ	Microsoft корпорациясының іскерлік интеллект платформасы	Business Intelligence Platform by Microsoft
ПИД	Хабарламаларды кезекпен телеметриялық беру хаттамасы	Message Queuing Telemetry Transport
АЦП	Машиналық оқыту	Machine Learning
PdM	Болжалды техникалық қызмет көрсету	Predictive Maintenance
RNN	Қайталанатын нейрондық желі	Recurrent Neural Network
LSTM	Ұзақ-қысқа мерзімді жады	Long Short-Term Memory
SVM	Анықтамалық векторлар әдісі	Support Vector Machine
ARIMA	Авторегрессиялық интеграцияланған жылжымалы орташа	AutoRegressive Integrated Moving Average
mAP	орташа дәлдік	mean Average Precision
F1-score	Дәлдік пен толықтық арасындағы гармоникалық орта	F-score
ELBO	Ықтималдықтың төменгі шегі	Evidence Lower Bound
ROC	Қабылдағыштың жұмыс сипаттамасы	Receiver Operating Characteristic
MTBF	Бас тарту арасындағы орташа уақыт	Mean Time Between Failures

СОДЕРЖАНИЕ

1.ОБЗОРНАЯ ЧАСТЬ: АНАЛИЗ ПРОБЛЕМЫ И СУЩЕСТВУЮЩИХ РЕШЕНИЙ В ОБЛАСТИ ОРИЕНТАЦИИ СОЛНЕЧНЫХ ПАНЕЛЕЙ 6

- 1.1 Актуальность темы: обоснование необходимости проведенного исследования 6
- 1.2 Существующие методы решения и технологии ориентации солнечных панелей 10
- 1.3 Постановка задачи исследования 19

2. РАЗРАБОТКА МЕХАНИЗМА АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ НАКЛОНА СОЛНЕЧНОЙ ПАНЕЛИ..... 22

- 2.1 Выбор компонентов 22
- 2.2 Функциональная блок-схема системы 30
- 2.3 Электрическая принципиальная схема 32
- 2.4 Алгоритм работы системы (с элементами математических моделей) 33
- 2.5 3D-модель системы 41

3.СБОРКА И ПЕРВИЧНЫЕ ИСПЫТАНИЯ ПРОТОТИПА СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ НАКЛОНА СОЛНЕЧНОЙ ПАНЕЛИ..... 46

- 3.1 Изготовление и сборка прототипа 46
- 3.2 Испытание на работоспособность 48
- 3.3 Рассуждение о выбранных моделях 50
- 3.4 Принцип работы TensorFlow Lite Micro 53
- 3.5 TensorFlow Lite Micro с STM32 54

4.АНАЛИЗ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ И ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ В УСЛОВИЯХ ГОРОДА АЛМАТЫ 56

- 4.1 Методология моделирования и исходные параметры 56
- 4.2. Результаты моделирования энергетической производительности 58

Заключение..... 61

Список литературы 62

1.ОБЗОРНАЯ ЧАСТЬ: АНАЛИЗ ПРОБЛЕМЫ И СУЩЕСТВУЮЩИХ РЕШЕНИЙ В ОБЛАСТИ ОРИЕНТАЦИИ СОЛНЕЧНЫХ ПАНЕЛЕЙ

1.1 Актуальность темы: обоснование необходимости проведенного исследования

Современное человечество сталкивается с серьезными энергетическими и экологическими вызовами, которые возникли вследствие многолетней зависимости от ископаемых видов топлива. Последние данные ООН свидетельствуют о том, что к 2050 году мировое население увеличится до 9,8 миллиарда человек, что почти на два миллиарда превысит текущие показатели в 7,6 миллиарда. Прогнозы специалистов ООН предупреждают, что к окончанию текущего века количество человечества может вырасти и до 11,2 миллиарда за счет индустриализации стран с развивающейся экономикой, что приведет к усилению спроса на энергию на мировом уровне.

Это обстоятельство существенно нагружает традиционные энергетические ресурсы, такие как уголь, нефть и природный газ. Помимо очевидного риска их исчерпания уже в ближайшие десятилетия, эти источники несут ответственность за основной объем выбросов парниковых газов. Уровень концентрации углекислого газа (CO_2) в атмосфере достиг исторического максимума, что спровоцировало глобальные климатические изменения. Уже сегодня по всему миру заметны последствия этого кризиса: рекордные температуры и волны жары, длительные периоды засухи, сменяющиеся масштабными наводнениями, возрастающее количество и разрушительная сила ураганов, стремительное таяние полярных ледников и вечной мерзлоты. Это, в свою очередь, вызывает высвобождение больших объемов метана, что дополнительно усугубляет проблему глобального потепления [1].

Для эффективного ответа на данные вызовы необходим кардинальный переход на устойчивые, возобновляемые источники энергии и внедрение новых технологий, позволяющих сократить зависимость от ископаемого топлива и минимизировать вредное воздействие на окружающую среду.

Принцип работы солнечных панелей заключается в использовании фотоэлектрического эффекта, при котором особые полупроводниковые материалы способны преобразовывать энергию света непосредственно в электричество. В момент, когда солнечные фотоны достигают поверхности фотоэлемента, они передают свою энергию электронам в атомах полупроводника. В результате этого взаимодействия электроны высвобождаются из атомов и начинают свободно перемещаться, формируя таким образом электрический ток (см. рисунок 1). Стоит отметить, что эффективность генерации электроэнергии существенно зависит от угла, под которым солнечные лучи попадают на панель: максимальная мощность достигается, когда солнечные лучи падают перпендикулярно поверхности фотоэлементов. Любое отклонение от этого идеального угла приводит к

снижению эффективности системы и уменьшению вырабатываемой электроэнергии.

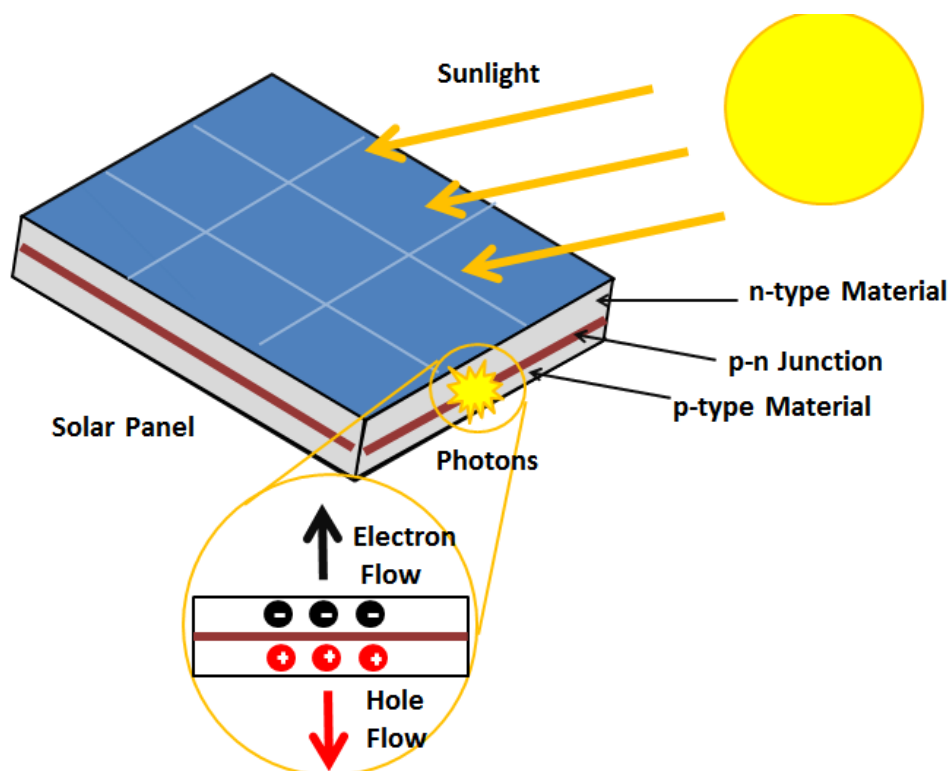


Рисунок 1.1- Схематическое изображение фотоэлектрического эффекта в ячейке солнечной панели.

Ключевым фактором, влияющим на эффективность солнечных панелей, является угол падения солнечных лучей. Этот угол определяется между направлением солнечного света и перпендикуляром (нормалью), проведенным к поверхности солнечной панели. Максимальная выработка электроэнергии достигается, когда лучи солнца попадают на панель строго перпендикулярно - то есть под нулевым углом падения относительно нормали (что соответствует углу в 90 градусов относительно плоскости панели). При таком положении солнечные лучи концентрируются максимально эффективно, позволяя фотоэлементам поглотить и преобразовать в электричество наибольшее количество доступной энергии. Любое отклонение от этого идеального угла снижает количество поглощенной энергии и, соответственно, уменьшает общую производительность панели.

Зависимость эффективности поглощения солнечной энергии от угла падения солнечных лучей определяется законом косинуса Ламберта.

$$I = I_0 * \cos(\theta)$$

Где:

I – интенсивность солнечного излучения, падающего на поверхность под углом θ .

I_0 – интенсивность излучения при нормальном падении (то есть при $\theta = 0^\circ$).

θ – угол между направлением солнечных лучей и нормалью к поверхности.

Согласно этому закону, интенсивность энергии, которую принимает солнечная панель, напрямую пропорциональна косинусу угла между направлением солнечных лучей и нормалью к ее поверхности. Иначе говоря, с увеличением угла падения уменьшается количество энергии, достигающей поверхности фотоэлементов. Например, если угол падения лучей составляет 45 градусов, то количество поглощаемой энергии уменьшается примерно на 30%, что значительно влияет на производительность и эффективность всей солнечной установки.

Солнечные панели, закреплённые под постоянным углом, неизбежно сталкиваются с ощутимыми потерями вырабатываемой энергии в течение суток. Причиной этого является постоянное перемещение Солнца по небосводу с востока на запад, а также изменение его высоты над горизонтом в зависимости от времени года. В результате, в утренние и вечерние часы солнечные лучи падают на панели под значительным углом, далеко не оптимальным для эффективного поглощения света. По различным оценкам, стационарные солнечные панели в эти периоды могут упускать до 75% от потенциально доступной энергии. В связи с этим возрастает важность применения систем слежения за Солнцем, способных корректировать положение панелей и таким образом минимизировать потери, существенно повышая общую эффективность фотоэлектрических установок.

В сложившейся ситуации переход на возобновляемые источники энергии (ВИЭ) становится неизбежной необходимостью и единственно верным путем устойчивого развития. Среди различных ВИЭ, таких как энергия солнца, ветра, воды, геотермальная и биоэнергетика, именно солнечная энергетика отличается наибольшей универсальностью, практически неограниченным ресурсом и постепенно снижающейся стоимостью технологий.

Каждый час солнце направляет на поверхность земли количество энергии, которого хватило бы для покрытия годовой потребности всего человечества [4]. Современные фотоэлектрические панели, способные напрямую превращать солнечный свет в электрический ток, демонстрируют значительный прогресс в развитии технологий, что отражается в быстром росте общей установленной мощности солнечных электростанций во всём мире. Это делает солнечную энергетику ключевым направлением в решении энергетических и экологических проблем планеты.

Несмотря на очевидные достоинства солнечных панелей, их реальная эффективность напрямую зависит от правильности ориентации относительно положения солнца. Наибольший выход энергии достигается лишь при условии, что солнечные лучи падают точно перпендикулярно рабочей поверхности фотоэлектрических элементов. Однако из-за постоянного перемещения солнца в течение дня и изменения его положения в разные сезоны, панели, которые зафиксированы под постоянным углом, редко оказываются в идеальном положении относительно солнца. В результате этого

потери энергии могут варьироваться от 30 до 50 процентов и более, особенно если панели установлены в регионах с высокими широтами или неправильно выбран угол их фиксации [5]. Подобные потери напрямую снижают экономическую привлекательность и удлиняют срок окупаемости солнечных проектов, подчеркивая необходимость внедрения более гибких и адаптивных систем ориентации панелей.

Для преодоления указанных недостатков стационарных солнечных панелей активно используются специальные устройства – системы автоматического слежения за солнцем, известные как солнечные трекеры. Их основная задача заключается в постоянной или периодической корректировке ориентации солнечной панели таким образом, чтобы солнечные лучи всегда падали под максимально благоприятным углом на её поверхность в течение всего дня. Благодаря этому, использование трекеров позволяет значительно увеличить выработку электроэнергии. По данным различных исследований, годовой прирост генерации энергии при использовании одноосных трекеров достигает примерно 20–45%, а при двухосных – от 35 до 55 процентов, по сравнению с неподвижными солнечными установками. Это существенно повышает экономическую эффективность солнечных проектов, сокращает сроки их окупаемости и способствует более рациональному использованию территорий, выделенных под строительство солнечных электростанций.

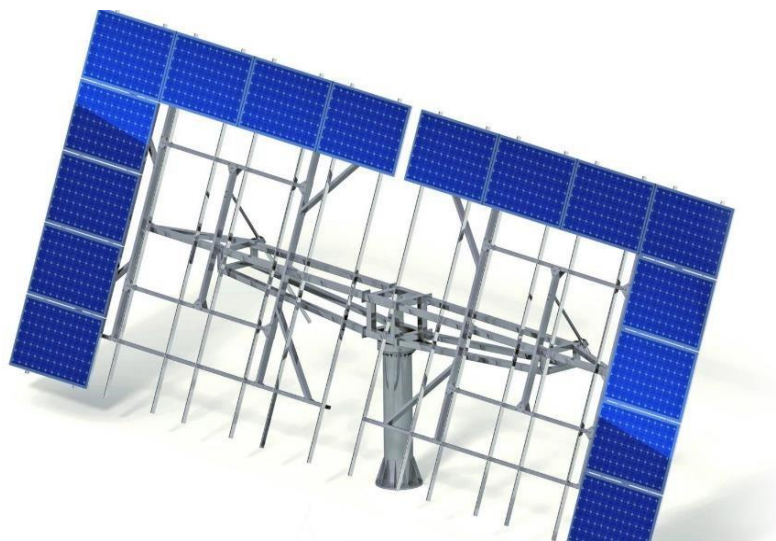


Рисунок 1.2 - Двухосевые трекеры

Разработка и внедрение эффективных, а главное - доступных по стоимости систем слежения за солнцем приобретает особую значимость для стран с высоким уровнем солнечной инсоляции, таких как Республика Казахстан. Благодаря обширной территории, большому количеству солнечных дней в году и активной государственной политике в области поддержки возобновляемых источников энергии, Казахстан располагает всеми предпосылками для масштабного использования солнечной энергетики [7].

Интеграция солнечных трекеров в энергетическую инфраструктуру

позволит значительно повысить эффективность фотоэлектрических установок и более полно использовать имеющийся природный потенциал. Это станет важным шагом к достижению национальных целей по увеличению доли ВИЭ в энергобалансе страны, снижению зависимости от ископаемого топлива и улучшению экологической ситуации. Кроме того, развитие и производство отечественных систем слежения будет способствовать росту технологической независимости, созданию новых рабочих мест и стимулированию научно-инженерного прогресса внутри страны. Проведение исследований, посвящённых разработке и усовершенствованию механизмов автоматического изменения наклона солнечных панелей, обусловлено рядом фундаментальных причин, среди которых можно выделить следующие:

- Кризис изменения климата и находящуюся на пороге декарбонизацию экономики принесли с собой неотложную и масштабную необходимость перейти на экологически чистые источники энергии.

- Неуклонный рост мирового энергопотребления, который невозможно удовлетворить только за счет традиционных ресурсов без катастрофических последствий для окружающей среды.

- Задача повышения конкурентоспособности солнечной энергетики за счет максимизации выработки энергии с единицы установленной мощности и снижения удельной стоимости производимой электроэнергии.

- Потребность в разработке экономически доступных и надежных технологий слежения, адаптированных для различных масштабов применения - от крупных промышленных электростанций до небольших автономных систем в удаленных районах или для частных нужд, что особенно важно для стимулирования распределенной генерации.

Данная диссертационная работа направлена на внесение практического вклада в решение одной из приоритетных задач - создание и экспериментальная проверка простого, доступного и в то же время эффективного механизма автоматического регулирования наклона солнечной панели. Разрабатываемое устройство ориентировано на широкую сферу применения и призвано обеспечить более полное и рациональное использование солнечной энергии, особенно в условиях, благоприятных для её генерации.

1.2 Существующие методы решения и технологии ориентации солнечных панелей

Вопрос оптимальной ориентации солнечных панелей с целью максимального поглощения солнечной энергии уже многие годы является важной инженерной задачей. В результате этого интереса было разработано и внедрено большое количество разнообразных технологических решений. Несмотря на широкий спектр конструкций, все существующие системы можно условно разделить на две основные категории: пассивные и активные. Активные, в свою очередь, подразделяются на системы с разомкнутым и

замкнутым контуром управления. Каждый из этих подходов имеет свои особенности, сильные и слабые стороны, что определяет их эффективность и целесообразность использования в тех или иных климатических, технических и экономических условиях.

Пассивные системы слежения представляют собой одни из самых ранних и конструктивно простых решений в области ориентации солнечных панелей. Их функционирование основано на использовании естественных физических процессов и не требует подключения к внешним источникам энергии для приведения в движение. Обычно в таких системах применяется механизм, основанный на разнице давлений или объемов рабочих веществ, чаще всего - легкокипящих жидкостей, таких как фреоны или спирты. Эти жидкости помещаются в герметично закрытые цилиндры, установленные по обе стороны от оси вращения панели. При неравномерном солнечном облучении один из цилиндров нагревается сильнее, что вызывает расширение или испарение содержащейся в нем жидкости и, как следствие, увеличение давления. Возникающий дисбаланс давлений между цилиндрами приводит к перемещению жидкости или пара в менее нагретый отсек, вызывая наклон или поворот панели в сторону наилучшего освещения. Таким образом, система автоматически реагирует на перемещение солнца, обеспечивая пассивную корректировку угла ориентации панели без использования электроники или электроприводов [8].

Главными достоинствами являются абсолютная простота конструкции, очень низкая начальная стоимость и полная автономность от электропитания, что делает их привлекательными для удаленных маломощных приложений, где нет доступа к сети или аккумуляторам.

Тем не менее, пассивные системы слежения характеризуются рядом значительных эксплуатационных ограничений. Ключевым недостатком является их крайне низкая точность ориентации на Солнце. Кроме того, скорость их реакции на изменение положения светила или флуктуации уровня освещенности, например, при появлении облачности, является весьма незначительной. Эффективность работы таких систем также сильно зависит от температурных условий окружающей среды: при низких температурах рабочие жидкости могут утрачивать необходимые физические свойства, тогда как в условиях сильной жары возможен их перегрев. Пассивные трекеры чувствительны к воздействию ветровых нагрузок, которые способны нарушить их равновесное состояние или даже привести к механическим повреждениям. Диапазон углов, в котором эти системы могут осуществлять слежение, как правило, ограничен. Вследствие перечисленных ограничений, пассивные трекеры в настоящее время практически не находят применения в коммерческих проектах солнечной энергетики и рассматриваются скорее как решения, представляющие исторический или узкоспециализированный интерес.

Активные системы с разомкнутым контуром управления (без обратной связи), также известные как астрономические или программные трекеры, ориентируют солнечную панель на основе заранее вычисленного положения

Солнца. В основе их работы лежит микропроцессор или ПЛК, который использует математические алгоритмы для расчета азимута и угла возвышения Солнца в любой момент времени для заданных географических координат (широты, долготы) и текущей даты [9]. На основе этих расчетов контроллер подает команды на исполнительные механизмы (обычно шаговые двигатели или двигатели постоянного тока с энкодерами) для поворота панели в требуемое положение.

При ясной погоде и при условии корректной первоначальной настройки пассивные системы слежения способны обеспечивать высокую точность наведения на источник света. Это преимущество связано с тем, что их работа не зависит от кратковременных колебаний уровня освещённости, вызванных, например, частичным затенением панели облаками, скоплениями пыли или близко расположенными объектами. Благодаря своей конструкции такие системы реагируют исключительно на общее тепловое воздействие солнечного излучения, что делает их работу стабильной и предсказуемой. Движение панели происходит по заранее понятной и повторяемой траектории, что существенно упрощает проектирование, настройку и дальнейшую эксплуатацию солнечных установок, особенно в условиях открытой и незатенённой местности.

Главным недостатком пассивных систем слежения является отсутствие механизма обратной связи, что делает их неспособными к самостоятельной коррекции положения в случае возникновения ошибок позиционирования. Такие отклонения могут быть вызваны механическим износом компонентов, люфтами в редукторах, проскальзыванием приводных элементов или неточностями, допущенными на этапе установки - например, неправильной ориентацией по сторонам света либо ошибкой в задании начального угла. Кроме того, подобные системы не приспособлены к условиям рассеянного солнечного излучения, характерным для пасмурной погоды. В таких ситуациях максимальная интенсивность света может исходить не от Солнца напрямую, а от ярчайшей области неба, которую пассивный трекер определить не в состоянии. Для достижения большей точности в позиционировании подобных систем требуется применение внешних источников времени (RTC) и точной информации о географических координатах установки. Также стоит учитывать, что реализация алгоритмов, способных точно рассчитывать положение Солнца в разное время суток и года, требует высокой вычислительной мощности со стороны управляющего контроллера, что может осложнить разработку и увеличить стоимость системы.

Активные системы с замкнутым контуром управления, также известные как сенсорные трекеры, применяют различные датчики для определения текущего положения Солнца относительно поверхности панели и выполняют динамическую корректировку ориентации в реальном времени, чтобы обеспечить максимальное попадание солнечного излучения. Наиболее часто в таких системах используют светочувствительные компоненты: фоторезисторы, фотодиоды, фототранзисторы, аналогичные тем, что используются в цифровых камерах. Обычно сенсоры размещаются попарно и

симметрично относительно оси вращения панели либо разделяются светонепроницаемой перегородкой. Принцип работы таких систем заключается в следующем: при смещении панели от оптимального положения один из сенсоров получает больше света, чем другой. Контроллер фиксирует разницу сигналов с этих датчиков и формирует управляющие команды для приводных механизмов. Моторы поворачивают панель до тех пор, пока уровень освещённости на обоих сенсорах не станет одинаковым, что, как правило, соответствует перпендикулярному падению солнечных лучей на поверхность панели. Таким образом, обеспечивается непрерывная автоматическая настройка ориентации панели в соответствии с текущим положением солнца.

Основным преимуществом активных систем с обратной связью является их способность оперативно адаптироваться к реальным условиям освещённости, включая переменную облачность, туман, пыль в атмосфере и преобладание рассеянного солнечного излучения. В отличие от систем с жёстко заданной траекторией движения, сенсорные трекеры реагируют непосредственно на освещённость, поступающую в данный момент, что делает их особенно эффективными в нестабильных метеоусловиях. Такие системы не нуждаются в сложных астрономических вычислениях, точном времени суток или координатах местоположения, что значительно упрощает их установку, настройку и повседневную эксплуатацию. Кроме того, базовые алгоритмы управления, реализуемые в микроконтроллерах, достаточно просты по структуре, что делает возможным создание недорогих и энергоэффективных решений для широкого применения [10].

Тем не менее, активные сенсорные системы слежения имеют и существенные недостатки, главным из которых является склонность к нестабильному поведению, известному как эффект "охоты" за солнцем. В подобных условиях панель совершает множество незначительных корректирующих движений в попытке удерживать оптимальное направление, что особенно выражено при быстро меняющейся облачности или в случае наличия паразитной засветки, вызванной отражениями от близлежащих объектов. Это не только увеличивает общее энергопотребление системы, но и ускоряет износ механических компонентов. Кроме того, точность позиционирования сенсорных трекеров в идеальных условиях - при ясном небе - может уступать астрономическим системам, основанным на вычислении положения Солнца. Это связано с возможными отклонениями в характеристиках сенсоров, погрешностями калибровки или загрязнением их поверхностей пылью, грязью либо органическими отложениями. Такие внешние и аппаратные факторы могут приводить к ложным срабатываниям, неправильной ориентации панели и снижению общей эффективности системы.

Гибридные системы слежения представляют собой попытку объединить сильные стороны как астрономических, так и сенсорных методов управления. В подобных системах первоначальное наведение солнечной панели осуществляется на основе расчетных астрономических данных, что

обеспечивает базовую ориентацию в пространстве. После этого положение панели уточняется с помощью сигналов от светочувствительных датчиков, что позволяет достичь высокой точности и адаптивности в условиях реальной освещенности [11]. Такой подход позволяет минимизировать недостатки каждого из методов, повышая общую надежность и эффективность системы. Например, в условиях облачной погоды, когда данные от сенсоров могут быть неточными или нестабильными, управление переходит на астрономический режим. Как только Солнце появляется на горизонте или выходит из-за облаков, система автоматически возвращается к точной доводке с использованием датчиков, обеспечивая оптимальную ориентацию панели на протяжении всего светового дня.

Анализ современных технологий солнечного слежения в передовых странах, таких как Китай, Россия и США, показывает, что развитие этих систем имеет глобальный охват, но в то же время каждая из стран формирует собственные приоритеты и подходы. Особенности технологических решений в этих странах во многом определяются сочетанием климатических условий, уровня государственной поддержки, научно-технического потенциала, а также экономических реалий.

Китай:

За последние двадцать лет Китайская Народная Республика совершила впечатляющий рывок, став безоговорочным мировым лидером в солнечной энергетике. Сегодня Китай доминирует не только в производстве фотоэлектрических панелей, но и в строительстве солнечных электростанций, в том числе оснащенных системами слежения за Солнцем. Такой стремительный прорыв стал результатом целенаправленной государственной политики, включающей масштабные инвестиции, долгосрочное стратегическое планирование и активную поддержку научных исследований и конструкторских разработок.

Новейшие технологии и решения:

Интеллектуализация управления на базе ИИ и ML: Китайские компании, такие как Huawei (с их комплексными решениями FusionSolar Smart PV), Trina Solar, Sungrow, активно внедряют алгоритмы искусственного интеллекта и машинного обучения для оптимизации работы не только отдельных трекеров, но и целых солнечных парков. Эти системы анализируют огромные массивы данных: исторические данные по выработке, текущие показания с тысяч датчиков на панелях и трекерах, метеорологические прогнозы (облачность, скорость ветра, температура), топографию местности. На основе этого анализа ИИ-алгоритмы могут предсказывать оптимальную траекторию движения для каждой группы панелей, адаптироваться к быстро меняющимся погодным условиям в реальном времени, минимизировать эффект взаимного затенения панелей в плотных рядах (алгоритмы "multi-row backtracking" или "terrain-adaptive backtracking"), и даже оптимизировать графики очистки панелей [12]. Это позволяет добиться дополнительного прироста выработки на несколько процентов по сравнению с традиционными алгоритмами слежения.

Интеграция с системами хранения энергии (СХЭ): Разрабатываются

интеллектуальные системы, которые координируют работу солнечных трекеров и накопителей энергии, оптимизируя заряд/разряд батарей в зависимости от прогноза выработки и потребностей сети.

Развитие беспроводных технологий и Промышленного Интернета Вещей (IIoT): Для упрощения монтажа, снижения кабельной продукции и облегчения мониторинга и управления крупными солнечными полями активно используются беспроводные технологии связи между трекерами и центральными контроллерами (например, LoRaWAN, NB-IoT, Zigbee). Это позволяет собирать данные с каждого трекера и управлять им удаленно.

Роботизация обслуживания: Интеграция роботизированных систем для автоматической очистки солнечных панелей от пыли и снега. Эти роботы могут использовать инфраструктуру самих трекеров для перемещения или быть полностью автономными. Эффективная очистка критически важна, особенно в засушливых и пыльных регионах.

Снижение стоимости и повышение надежности механических конструкций: За счет огромных объемов производства и конкуренции китайские производители постоянно работают над снижением себестоимости металлоконструкций трекеров, не забывая при этом о повышении их надежности и устойчивости к ветровым и снеговым нагрузкам, что достигается за счет использования новых сплавов и оптимизации конструкций с помощью компьютерного моделирования (FEA).

США:

Соединенные Штаты Америки, с их сильной научной базой и высокоразвитой технологической индустрией, традиционно считаются одним из ключевых мировых центров инноваций в области солнечной энергетики. Американские коммерческие компании и государственные исследовательские учреждения, включая такую известную организацию, как Национальная лаборатория возобновляемой энергии (NREL), играют ведущую роль в создании и совершенствовании передовых технологий для солнечных трекеров.

Новейшие технологии и решения:

Особое внимание американские производители, такие как Array Technologies, Nextracker и FTC Solar, уделяют разработке высокоточных и надежных двухосевых трекеров. Эти системы нацелены на обеспечение максимального прироста в выработке электроэнергии. Основные инженерные усилия сосредоточены на увеличении срока службы и безотказности механических компонентов, таких как подшипники, редукторы и приводы. Важным направлением является создание систем, устойчивых к экстремальным ветровым нагрузкам, вплоть до ураганных скоростей, а также к значительным снеговым нагрузкам [13]. Для этого применяются как пассивные методы защиты, например, оптимизация аэродинамических характеристик конструкции, так и активные, включающие алгоритмы "stow mode" – автоматического перевода панелей в безопасное горизонтальное или иное защищенное положение при сильном ветре.

Продвинутые алгоритмы управления и сенсорные системы:

Разрабатываются адаптивные алгоритмы, которые не только следуют за Солнцем, но и учитывают такие факторы, как отраженный свет от снега или светлых поверхностей (albedo), что может дать дополнительный прирост выработки. Ведутся исследования по использованию более сложных сенсорных систем, например, камер с широкоугольными объективами и алгоритмов компьютерного зрения для анализа распределения яркости по небу и определения оптимальной ориентации панели даже в условиях сплошной облачности или тумана, когда традиционные LDR-датчики могут быть неэффективны.

Программное обеспечение для проектирования, мониторинга и предиктивного обслуживания: Большое внимание уделяется разработке комплексных программных платформ (например, SCADA-системы, специализированные облачные сервисы). Эти платформы позволяют не только осуществлять мониторинг работы каждого трекера в режиме реального времени и управлять ими удаленно, но и проводить детальное моделирование эффективности солнечной электростанции еще на этапе проектирования (с учетом рельефа местности, климатических данных, конфигурации трекеров). Алгоритмы машинного обучения используются для предиктивного анализа состояния оборудования, предсказания возможных отказов и оптимизации графиков технического обслуживания [14].

Инновации в материалах и конструкциях: Исследуются и внедряются новые материалы для конструкций трекеров, такие как высокопрочные стали, алюминиевые сплавы и композитные материалы, с целью снижения веса конструкции (что уменьшает нагрузку на приводы и фундаменты), повышения коррозионной стойкости и упрощения монтажа. [15]

Стандартизация и модульность: Стремление к стандартизации компонентов и модульности конструкций для ускорения и удешевления процесса развертывания крупных солнечных электростанций.

Россия:

В Российской Федерации развитие солнечной энергетики и связанных с ней технологий, включая системы слежения, происходит с учетом специфических климатических и географических особенностей страны. Несмотря на некоторое отставание от мировых лидеров по объемам внедрения, существует значительный научный и производственный потенциал.

Новейшие технологии и решения:

Адаптация к условиям низких температур и высоких снеговых нагрузок: Это одно из ключевых направлений. Разрабатываются трекеры, способные надежно функционировать при температурах до -40°C и ниже. Это требует использования специальных морозостойких материалов для механических узлов, кабелей, смазочных материалов, а также разработки систем подогрева для критически важных компонентов. Особое внимание уделяется алгоритмам сброса снега с поверхности панелей путем их периодического наклона под большим углом или вибрации, а также конструкциям, минимизирующим накопление снега.

Разработка трекеров для высоких широт: В северных регионах России Солнце в зимний период находится низко над горизонтом, а световой день короткий. Для таких условий разрабатываются трекеры с расширенным диапазоном углов наклона по вертикальной оси (углу места) и алгоритмы, оптимизирующие сбор энергии в условиях низкой инсоляции и преобладания рассеянного света.

Одноосные трекеры с различными конфигурациями оси: Для различных регионов России предлагаются как трекеры с наклонной осью, параллельной оси Земли (полярные трекеры), так и более простые и дешевые одноосные трекеры с горизонтальной или вертикальной осью вращения. Выбор конкретного типа зависит от широты местности, рельефа и экономических соображений.

Локализация производства и импортозамещение: Государственная политика направлена на стимулирование локализации производства компонентов для солнечной энергетики, включая металлоконструкции для трекеров, системы управления, силовую электронику. Это позволяет снизить зависимость от импорта, создать рабочие места и адаптировать продукцию к местным требованиям. Компании, такие как "Хевел", помимо производства солнечных модулей, также занимаются строительством СЭС и могут использовать или разрабатывать системы слежения.

Научные исследования и разработки: В российских университетах и научно-исследовательских институтах (например, ФИАН, институты РАН, профильные технические вузы) ведутся исследования по созданию собственных алгоритмов управления солнечными трекерами, в том числе с применением методов нечеткой логики, нейронных сетей, а также по разработке контроллеров на отечественной элементной базе. Исследуются вопросы повышения надежности и долговечности трекеров в суровых климатических условиях.

Таблица 1.1 – Сравнительный анализ технологий солнечных трекеров в Китае, США и России

Параметр сравнения	Китай	США	Россия
Масштаб внедрения трекеров	Очень высокий, мировой лидер по установленной мощности с трекерами.	Высокий, особенно в крупных промышленных СЭС в юго-западных штатах.	Средний, но быстро растущий, с акцентом на промышленные СЭС в рамках госпрограмм
Основные типы трекеров	Акцент на оптимизацию стоимости и	Преимущественно высокоэффективные двухосевые	Преимущественно одноосные трекеры

	масштабируемость.	трекеры для максимизации выработки,	адаптированные к местным условиям.
Ключевые инновационные направления	ML , IoT для мониторинга и управления, роботизировано	Использование продвинутых сенсоров (камеры, лидары).	Производства ключевых компонентов, разработка систем для автономного энергоснабжения.
Примеры передовых решений/компаний	Huawei , Trina Solar , Sungrow LONGi, Jinko Solar	Array Technologies, Nextracker, FTC Solar	"Хевел", "Солар Системс", локальные производители металлоконструкций и систем управления
Уровень использования ИИ/ML	Высокий и быстрорастущий	Растущий, особенно в ПО для анализа больших данных	Начальный/исследовательский уровень
Адаптация к климату	Широкий диапазон климатических зон	Упор на защиту от ураганных ветров.	Ключевой фокус: экстремально низкие температуры,
Стоимость технологий	Низкая до средней	Средняя до высокой, акцент на долгосрочную надежность	Средняя, сильно зависит от степени локализации производства
Фокус на НИОКР	Снижение удельной стоимости энергии (LCOE)	Повышение общей эффективности и надежности систем	Создание конкурентоспособных решений

Анализ показал, что, несмотря на единую глобальную цель - повышение эффективности использования солнечной энергии, - стратегии её достижения в разных странах заметно различаются. Эти различия обусловлены уровнем экономического развития, состоянием научно-технической базы, климатическими условиями и приоритетами государственной политики в сфере энергетики. Так, одни страны делают ставку на массовое внедрение

доступных решений, другие - на передовые интеллектуальные технологии и интеграцию с цифровой инфраструктурой.

Тем не менее, можно выделить общую мировую тенденцию: активное движение в сторону "интеллектуализации" систем солнечного слежения. Это проявляется в широком внедрении технологий сбора, анализа и обработки данных, в том числе на основе AI и ML. Современные решения всё чаще становятся автономными, более надёжными и энергоэффективными, при этом особое внимание уделяется снижению стоимости владения и технического обслуживания на протяжении всего жизненного цикла оборудования. Эти тенденции формируют основу для следующего этапа развития солнечной энергетики - более умной, устойчивой и адаптированной к различным условиям эксплуатации.

1.3 Постановка задачи исследования

Несмотря на значительный прогресс в разработке и применении солнечных трекеров, особенно в сфере крупных промышленных фотоэлектрических станций, остаётся актуальной задача создания простых, энергоэффективных и экономически доступных систем слежения, ориентированных на маломощные и автономные солнечные установки. Проведённый анализ существующих технологий показывает, что многие современные решения, используемые на мегаваттных солнечных фермах, отличаются высокой стоимостью и сложностью, что делает их неприменимыми или нецелесообразными для менее масштабных объектов.

В частности, для таких применений, как частные домовладения, небольшие фермерские хозяйства, удалённые объекты инфраструктуры (вышки связи, автономные метеостанции и пр.), а также образовательные установки, критически важными становятся минимизация начальных инвестиций и простота технического обслуживания. В этих условиях избыточная технологичность, характерная для промышленных систем, не только не даёт значительных преимуществ, но и может существенно усложнить эксплуатацию. Именно поэтому необходимы специализированные разработки, ориентированные на практичность, надёжность и эффективность при минимальной стоимости, что позволит расширить сферу применения солнечных трекеров и повысить доступность солнечной энергетики для широкого круга пользователей [16].

Особое внимание американские производители, такие как Array Technologies, Nextracker и FTC Solar, уделяют разработке высокоточных и надёжных двухосевых трекеров. Эти системы нацелены на обеспечение максимального прироста в выработке электроэнергии. Основные инженерные усилия сосредоточены на увеличении срока службы и безотказности механических компонентов, таких как подшипники, редукторы и приводы. Важным направлением является создание систем, устойчивых к экстремальным ветровым нагрузкам, вплоть до ураганных скоростей, а также

к значительным снеговым нагрузкам [16]. Для этого применяются как пассивные методы защиты, например, оптимизация аэродинамических характеристик конструкции, так и активные, включающие алгоритмы "stow mode" – автоматического перевода панелей в безопасное горизонтальное или иное защищенное положение при сильном ветре. Системы слежения, использующие доступные фоторезисторы в качестве светочувствительных датчиков и стандартные микроконтроллеры для управления, представляют собой хороший баланс между простотой конструкции, низкой ценой и получаемым увеличением эффективности. Аналогично, небольшие сервоприводы, такие как SG90, очень дешевы, легко управляются стандартным ШИМ-сигналом и обладают достаточным усилием для поворота небольших солнечных панелей, что делает их отличным выбором для недорогих прототипов и малых системах.

Однако даже в рамках таких, на первый взгляд, простых систем существуют значительные резервы для усовершенствования и проведения научных исследований. Ключевые направления здесь включают:

- *Оптимизацию алгоритмов управления:* Базовые алгоритмы сравнения сигналов с LDR могут быть неэффективны в условиях быстро меняющейся облачности, при наличии отраженного света или при частичном затенении датчиков. Требуется разработка более робастных алгоритмов, возможно, с элементами адаптации, фильтрации сигналов и логики принятия решений, учитывающей историю показаний и общую освещенность.

- *Минимизацию собственного энергопотребления системы слежения:* Для автономных систем критически важно, чтобы трекер потреблял как можно меньше энергии, так как эта энергия вычитается из полезной выработки солнечной панели. Это касается как оптимизации работы микроконтроллера (использование режимов сна), так и минимизации движений сервопривода (например, за счет введения "мертвой зоны" или адаптивного интервала коррекции положения).

- *Исследование потенциала применения элементов интеллектуальной обработки данных:* Даже если полноценная реализация сложных моделей машинного обучения на микроконтроллере STM32F103C8T6 затруднительна из-за ограниченности его ресурсов, методы анализа данных и машинного обучения могут быть использованы для:

Более глубокого понимания взаимосвязей между показаниями LDR, временем суток, погодными условиями и оптимальным углом наклона панели.

Выявления скрытых закономерностей и разработки на их основе улучшенных эвристических правил или упрощенных моделей, которые затем могут быть реализованы на микроконтроллере [17].

Оценки теоретического предела эффективности, достижимого с помощью более "умного" управления, по сравнению с базовым LDR-алгоритмом.

Для решения этой комплексной и многоаспектной задачи необходимо последовательно выполнить следующие подзадачи:

1. Провести углубленный критический анализ существующих

конструкций и алгоритмов управления солнечными трекерами, уделяя особое внимание решениям для маломощных систем и выявляя их преимущества, недостатки и области для потенциальных улучшений.

2. Обосновать выбор конкретной кинематической схемы механизма наклона солнечной панели, обеспечивающей требуемый диапазон углов, достаточную точность и надежность при минимальной сложности и стоимости, и разработать ее детальную конструкцию с использованием средств САПР.

3. Разработать принципиальную электрическую схему устройства, включая все необходимые интерфейсы между микроконтроллером, датчиками, исполнительным механизмом и системой питания, с учетом требований по энергоэффективности и помехозащищенности.

4. Разработать программное обеспечение для микроконтроллера STM32F103C8T6, которое должно реализовывать как базовый адаптивный алгоритм слежения по сигналам с фоторезисторов, так и специализированные функции для сбора, предварительной обработки и передачи на ПК массива данных, необходимых для последующего анализа и обучения моделей машинного обучения.

5. Сконструировать и отладить физический прототип системы слежения. Провести серию натурных экспериментальных исследований для оценки его реальной работоспособности в различных условиях освещенности и определения фактического прироста выработки электроэнергии по сравнению со стационарно установленной солнечной панелью.

6. Сформировать на основе собранных экспериментальных данных обучающий датасет. Исследовать возможность использования этого датасета для обучения предиктивной модели (например, нейронной сети) с помощью фреймворка TensorFlow, способной предсказывать оптимальный угол наклона панели. Провести сравнительный анализ потенциальной эффективности такого интеллектуального подхода с базовым LDR-алгоритмом на основе симуляций или, если возможно, путем реализации упрощенной ML-основанной логики на микроконтроллере.

Успешное решение поставленных задач позволит не только создать работающий прототип эффективной и доступной системы слежения за солнцем, но и внести вклад в научное понимание возможностей и ограничений применения интеллектуальных методов для оптимизации работы таких систем на базе микроконтроллеров с ограниченными ресурсами, что имеет важное значение для дальнейшего развития малой солнечной энергетики.

2. РАЗРАБОТКА МЕХАНИЗМА АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ НАКЛОНА СОЛНЕЧНОЙ ПАНЕЛИ

2.1 Выбор компонентов

Правильный выбор компонентов является краеугольным камнем в разработке эффективного механизма автоматического регулирования наклона солнечной панели. Для нашего проекта, нацеленного на создание системы слежения за солнцем с использованием микроконтроллера, двух сервоприводов, четырех фоторезисторов и ориентации на 6-вольтовую солнечную панель, этот этап определяет точность позиционирования, энергоэффективность системы и общую стоимость разработки. Ошибки в выборе могут привести к неработоспособности трекера, его низкой эффективности или неоправданному удорожанию. В данной главе мы подробно рассмотрим процесс выбора и обоснование для каждого ключевого компонента нашего солнечного трекера [18].

Перед тем как перейти к выбору конкретных моделей, необходимо четко сформулировать требования, исходя из задач нашего солнечного трекера.

Общие требования к системе:

- Точность слежения: Система должна обеспечивать достаточно точное позиционирование солнечной панели перпендикулярно солнечным лучам для максимизации выработки энергии.

- Автономность работы: Желательна минимальная необходимость вмешательства пользователя.

- Энергоэффективность: Собственное потребление системы должно быть минимальным, чтобы не снижать общий коэффициент полезного действия от использования солнечной панели.

- Надежность: Компоненты должны обеспечивать стабильную работу в предполагаемых условиях эксплуатации (для прототипа это могут быть комнатные условия, для финального устройства – уличные).

- Бюджет: Проект ориентирован на доступные и распространенные компоненты для создания экономически эффективного прототипа.

Требования к отдельным компонентам:

1. Микроконтроллер (МК):

- Функциональные требования: обеспечение приёма и обработки аналоговых сигналов от четырёх фоторезисторов, генерация двух независимых ШИМ-сигналов для управления сервоприводами, реализация алгоритма вычисления направления с наибольшей освещённостью и логики управления перемещением солнечной панели на основе полученных данных.

- Технические требования: наличие как минимум четырёх каналов аналого-цифрового преобразования для получения данных с фоторезисторов, не менее двух аппаратных выходов для генерации ШИМ-сигналов, необходимых для управления сервоприводами, а также достаточное количество универсальных портов ввода-вывода для возможного расширения системы - например, подключения кнопок ручного управления или

светодиодных индикаторов состояния. Кроме того, микроконтроллер должен обладать тактовой частотой, обеспечивающей быструю и стабильную реакцию системы на изменения уровня освещённости, а также достаточным объёмом Flash - памяти для хранения прошивки и оперативной памяти для обработки текущих данных.

- Прочие: низкая стоимость, широкая доступность на рынке, наличие удобной и желательно бесплатной среды разработки и отладки, активная поддержка сообществом разработчиков (наличие примеров кода, библиотек, форумов).

Приводы (для наклона панели):

- Функциональные требования: обеспечение двухосевого перемещения солнечной панели - по азимуту (горизонтальной оси) и по углу места (вертикальной оси) - с целью эффективного отслеживания видимого положения Солнца в течение всего светового дня.

- Технические требования: наличие крутящего момента, достаточного для поворота панели заданных массы и размеров (в данном случае - небольшой 6-вольтовой панели с незначительным весом), возможность вращения в пределах угла до 180° на каждом приводе для полного охвата суточной траектории движения Солнца, соответствующая угловая скорость и точность позиционирования, позволяющие плавно и точно следовать за медленным солнечным движением. Также важна совместимость с типовым напряжением питания сервоприводов, которое, как правило, составляет 4.8–6 В.

Прочие: малый собственный вес и габариты, низкая стоимость, простота управления (стандартный ШИМ-сигнал).

Датчики освещённости:

- Функциональные: Определение направления на источник максимальной освещённости (солнце) путем сравнения уровней света, падающего на пространственно разнесенные датчики.

- Технические: спектральная чувствительность, соответствующая видимому солнечному свету. Достаточное быстродействие для отслеживания медленного движения солнца. Простота сопряжения с АЦП микроконтроллера.

- Прочие: низкая стоимость, малые габариты, доступность и простота монтажа.

Солнечная панель (целевой объект):

- Технические: номинальное выходное напряжение 20В, как указано в теме проекта. Мощность 20Вт, соответствующая задачам прототипа (например, для демонстрации работы трекера, зарядки небольшого аккумулятора или питания маломощной нагрузки). Физические размеры и вес должны быть учтены при выборе сервоприводов и конструировании механической части трекера.

- Примечание: хотя сама солнечная панель является "полезной нагрузкой" системы, ее характеристики напрямую влияют на требования к механике и, как следствие, к выбору приводов.

На основе сформулированных требований был произведен выбор следующих компонентов, являющихся основой данного проекта:

В качестве центрального элемента управления солнечным трекером выбран популярный и широко доступный 32-битный микроконтроллер. Данный контроллер отличается хорошим соотношением цены и функциональности, обладает необходимыми аппаратными ресурсами для реализации алгоритмов слежения, обработки сигналов от датчиков и управления сервоприводами, что делает его оптимальным выбором для недорогих и компактных систем.

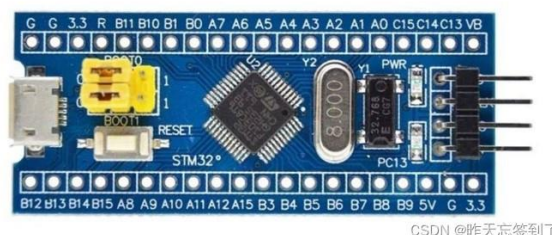


Рисунок 2.1- Микроконтроллер: STM32F103C8T6

Ядро ARM Cortex-M3: Обеспечивает высокую производительность (тактовая частота до 72 МГц), что более чем достаточно для обработки данных с четырех аналоговых датчиков, выполнения алгоритмов слежения и точного управления двумя сервоприводами в реальном времени [19].

- **АЦП:** STM32F103C8T6 имеет два 12-битных АЦП, способных работать с несколькими внешними каналами (до 10 на данном корпусе). Этого с запасом хватает для подключения четырех LDR. 12-битное разрешение АЦП позволяет получать более точные данные об уровне освещенности по сравнению с 8-битными или 10-битными АЦП в некоторых других МК.

- **Таймеры/ШИМ:** Микроконтроллер оснащен несколькими универсальными и продвинутыми таймерами, которые могут генерировать ШИМ-сигналы с аппаратной поддержкой. Это критически важно для точного и стабильного управления сервоприводами SG90 без значительной нагрузки на центральный процессор.

- **GPIO:** Большое количество портов ввода-вывода общего назначения (до 37 на корпусе LQFP48) позволяет не только подключить все основные компоненты (LDR, сервоприводы), но и оставить значительный задел для будущего расширения функционала (например, подключение датчиков конечного положения, кнопок ручного управления, LCD-дисплея для вывода информации или модуля беспроводной связи).

- **Память:** 64 КБ Flash-памяти для программы и 20 КБ SRAM для оперативных данных являются достаточными для размещения сложного алгоритма слежения, необходимых библиотек и переменных.

- **Стоимость и доступность:** Отладочные платы "Blue Pill" на основе STM32F103C8T6 чрезвычайно доступны по цене и широко распространены, что делает их идеальным выбором для бюджетных проектов и прототипирования.

- Среда разработки и экосистема: Поддерживается различными профессиональными и бесплатными средами разработки, такими как STM32CubeIDE (официальная от STMicroelectronics), STM32CubeMX (для графической конфигурации МК и генерации кода инициализации), а также Keil MDK, IAR EWARM. Существует также возможность программирования через Arduino IDE с использованием соответствующего ядра STM32.

- Сообщество и документация: Обширная документация от производителя и огромное количество примеров кода, библиотек и активное онлайн-сообщество разработчиков значительно упрощают процесс освоения и разработки.

Для обеспечения двухосевого движения солнечной панели выбраны два широко распространенных микросервопривода Tower Pro SG90.

Обоснование выбора:

- Соотношение цена/качество/доступность: SG90 являются одними из самых дешевых и легкодоступных сервоприводов на рынке, что идеально подходит для бюджетных учебных и хобби-проектов, включая наш прототип солнечного трекера.

- Достаточный крутящий момент для малой панели: SG90 обладают крутящим моментом около 1.8 кг/см (при напряжении питания 4.8В). Этого усилия достаточно для плавного поворота небольшой и легкой 6-вольтовой солнечной панели, которая обычно используется в таких прототипах.

- Угол поворота: Стандартный заявленный угол поворота составляет 0-180 градусов (хотя на практике эффективный диапазон может быть немного меньше, около 160-170 градусов). Этого диапазона достаточно для отслеживания солнца на протяжении большей части светового дня по обеим осям (азимут и угол места).

- Простота управления: Управляются стандартным ШИМ-сигналом (длительность импульса от ~0.5-1 мс до ~2-2.5 мс при частоте 50 Гц), что легко реализуется с помощью аппаратных ШИМ-модулей таймеров микроконтроллера STM32.

- Малый размер и вес: Компактные габариты (примерно 22.2 x 11.8 x 31 мм) и малый вес (около 9 грамм) упрощают конструирование механической части трекера и не создают значительной нагрузки на несущую конструкцию.

- Напряжение питания: Работают от стандартного напряжения в диапазоне 4.8В - 6В, что совместимо с типовыми источниками питания для микроконтроллерных систем и может быть обеспечено, например, от стабилизатора напряжения или напрямую от некоторых типов Li-Po аккумуляторов.



Рисунок 2.2 Сервопривод SG90

Примечание: Важно понимать, что для более крупных или тяжелых солнечных панелей сервоприводы SG90 будут недостаточно мощными. В таких случаях потребовались бы более мощные сервоприводы (например, MG995/MG996R с металлическим редуктором) или применение шаговых двигателей с соответствующими драйверами. Для определения направления на солнце и обеспечения обратной связи для системы слежения выбраны четыре стандартных фоторезистора (Light Dependent Resistors, LDR) [20].

Обоснование выбора:

- Крайняя простота и низкая стоимость: LDR являются очень простыми по своей структуре и чрезвычайно дешевыми пассивными компонентами. Их основное свойство – изменение электрического сопротивления в зависимости от интенсивности падающего на них света.
- Легкость сопряжения с АЦП: Фоторезисторы легко подключаются к аналого-цифровому преобразователю микроконтроллера через простой делитель напряжения (LDR последовательно с постоянным резистором). Напряжение в средней точке делителя будет изменяться пропорционально изменению сопротивления LDR, и, следовательно, интенсивности света.
- Эффективная конфигурация для трекинга: Использование четырех LDR, расположенных симметрично относительно центра солнечной панели (например, по углам или по сторонам света – Север, Юг, Запад, Восток) и, возможно, разделенных небольшими световыми барьерами или козырьками, позволяет эффективно определять направление максимальной освещенности. Логика микроконтроллера будет сравнивать показания с противоположных пар LDR (например, Восточный LDR с Западным, и Северный LDR с Южным) и управлять сервоприводами так, чтобы выровнять уровни освещенности на всех датчиках, тем самым направляя панель точно на солнце [22].
- Достаточная чувствительность: Обладают хорошей чувствительностью в видимом спектре солнечного излучения, что позволяет обнаруживать положение солнца даже при наличии легкой облачности, хотя точность системы в таких условиях может несколько снижаться.



Рисунок 2.3- Фоторезистор (LDR)

Характеристики солнечной панели (номинальное напряжение 6В) во многом заданы условиями темы проекта и типичны для небольших прототипов.

Обоснование выбора :

Напряжение: 6 Вольт является распространенным номинальным напряжением для небольших солнечных панелей, которые часто используются в образовательных проектах, для прототипирования и питания маломощной портативной электроники. Это напряжение может быть удобно понижено до 5В (например, с помощью линейного LDO стабилизатора типа L7805 или импульсного DC-DC преобразователя) для питания микроконтроллера и сервоприводов.

Размер и вес: небольшие 20-вольтовые панели обычно имеют малые габариты и вес, что делает их совместимыми с маломощными сервоприводами типа SG90 и упрощает создание легкой и компактной механической конструкции трекера.

Цель проекта: В данном проекте солнечная панель является основным объектом, эффективность работы которого мы стремимся повысить за счет системы автоматического слежения. Ее выходная мощность (которая может варьироваться, например, от 1 до 5 Вт для типовых небольших 6В панелей) будет определять, насколько ощутим будет выигрыш в выработке энергии от использования системы слежения.



Рисунок 2.4- Солнечная панель

Помимо основных, для сборки и успешного функционирования системы солнечного трекера потребуются следующие вспомогательные компоненты:

- Стабилизатор напряжения: Например, линейный стабилизатор L7805CV (или аналогичный LDO) для получения стабильного напряжения 5В для питания микроконтроллера и сервоприводов, если входное напряжение от солнечной панели или другого источника выше и нестабильно. Рекомендуется также использовать керамические и электролитические конденсаторы для фильтрации пульсаций по цепям питания.

- Резисторы: Четыре постоянных резистора (например, номиналом 10 кОм каждый) для создания делителей напряжения совместно с фоторезисторами LDR.

- Механические компоненты: Материалы для изготовления рамы солнечного трекера, креплений для солнечной панели и сервоприводов (например, листовая пластинка, фанера, алюминиевый профиль, детали, напечатанные на 3D-принтере).

- Источник питания для отладки: На этапе разработки и отладки, а также в случае недостаточной мощности солнечной панели для питания всей системы, может потребоваться внешний лабораторный источник питания (например, на 5-9В) или подходящий аккумулятор.

- Макетная плата и соединительные провода: Для первоначальной сборки и тестирования электронной части прототипа.

При выборе компонентов для данного конкретного проекта солнечного трекера особое внимание уделялось следующим интегрированным критериям:

- Полное соответствие функциональным требованиям: Все выбранные основные компоненты (STM32, SG90, LDR) напрямую обеспечивают выполнение всех поставленных задач: микроконтроллер STM32 – для интеллектуального управления и вычислений, сервоприводы SG90 – для точного механического движения, фоторезисторы LDR – для получения обратной связи по уровню освещенности[23].

- Минимизация стоимости: Микроконтроллер STM32F103C8T6 (в виде отладочной платы "Blue Pill"), сервоприводы SG90 и фоторезисторы LDR являются одними из самых бюджетных и экономически эффективных решений в своих категориях, что полностью соответствует цели создания недорогого, но функционального прототипа.

- Широкая доступность на рынке: Все указанные компоненты легко доступны для приобретения в большинстве розничных и интернет-магазинах электронных компонентов, что упрощает их закупку и возможное тиражирование проекта.

- Простота использования и интеграции: Сервоприводы SG90 управляются стандартным и хорошо документированным ШИМ-сигналом, фоторезисторы LDR легко подключаются к АЦП через простейший делитель напряжения, а для микроконтроллера STM32 существует огромное количество примеров кода, библиотек и подробных руководств.

- Умеренное энергопотребление: Микроконтроллер STM32F103C8T6 обладает различными режимами пониженного энергопотребления, которые могут быть задействованы для оптимизации. Сервоприводы SG90 потребляют значительный ток только непосредственно во время движения. Это является важным аспектом для системы, которая в идеале должна стремиться к максимальной энергоэффективности и, возможно, питаться от части энергии, вырабатываемой самой солнечной панелью [24].

Хотя основные компоненты для данного проекта уже определены его темой, в более общем инженерном подходе разработчик мог бы рассматривать и сравнивать различные альтернативы перед принятием окончательного решения:

Альтернативы микроконтроллерам:

ATmega328P (используется в Arduino Uno/Nano): Значительно проще в освоении для начинающих благодаря экосистеме Arduino, но обладает меньшей производительностью (8-битное ядро, 16 МГц), меньшим количеством каналов АЦП и ограниченными возможностями аппаратных ШИМ по сравнению с 32-битным STM32.

ESP8266/ESP32: Привлекательны наличием встроенных модулей Wi-Fi и Bluetooth, что могло бы быть полезно для реализации удаленного мониторинга или управления трекером. Однако для базовой задачи слежения их функционал может быть избыточен, а управление точными ШИМ-сигналами для нескольких сервоприводов одновременно с обработкой АЦП может потребовать более глубокого понимания их архитектуры или использования RTOS.

Альтернативы приводам:

Сервоприводы MG90S/MG996R: Являются более мощными аналогами SG90, часто имеют металлический редуктор, что повышает их долговечность и позволяет развивать больший крутящий момент. Однако они дороже и несколько тяжелее, чем SG90.

Шаговые двигатели (например, популярный 28BYJ-48 с драйвером ULN2003): Обеспечивают более точное позиционирование без обратной связи (в режиме открытого контура) и могут удерживать позицию без энергопотребления (если не используется режим удержания тока). Однако они обычно медленнее сервоприводов, требуют специального драйвера для управления и их логика управления сложнее.

Альтернативы датчикам освещенности:

Фотодиоды: Обладают лучшим быстродействием и более высокой линейностью характеристики по сравнению с LDR, но обычно генерируют меньший сигнал и могут требовать более сложной схемы усиления и обработки.

Специализированные датчики солнечного положения (Sun Position Sensors) или камеры с обработкой изображений: Могут обеспечивать значительно более высокую точность определения положения солнца, но они существенно дороже, сложнее в интеграции и их использование для данного проекта было бы избыточным [25].

Для данного проекта, ориентированного на доступность, простоту реализации и выполнение базовых функций слежения для небольшой солнечной панели, выбранный набор компонентов (STM32F103C8T6, SG90, LDR) представляется наиболее оптимальным и сбалансированным компромиссом между функциональностью, стоимостью и сложностью.

После окончательного выбора и закупки компонентов крайне важно тщательно задокументировать всю информацию, связанную с ними:

- Точные наименования и парт-номера (Part Numbers): Например, STM32F103C8T6, Tower Pro SG90 (или конкретная ревизия, если известна), тип используемых LDR (например, GL5528), точная модель и характеристики солнечной панели.

Ключевые технические характеристики:

Номинальные напряжения питания, максимальные и типичные токи потребления, диапазоны управляющих сигналов, распиновка.

Информация о поставщиках: Где были приобретены компоненты (названия магазинов, ссылки на страницы товаров) для возможности повторного заказа или поиска аналогов.

Принципиальные схемы подключения: Подробные схемы подключения фоторезисторов LDR к каналам АЦП микроконтроллера STM32, сервоприводов SG90 к ШИМ-выходам, а также общая схема питания всей системы.

Краткое обоснование выбора: Сводная информация, почему были выбраны именно эти компоненты по сравнению с возможными альтернативами для данного конкретного проекта, с акцентом на соответствие требованиям.

Тщательное документирование выбора компонентов не только упрощает процесс сборки, отладки и тестирования, но и обеспечивает возможность легкого воспроизведения проекта, его дальнейшей модернизации или передачи знаний другим разработчикам.

Выбор компонентов для солнечного трекера на базе STM32 – это процесс поиска оптимального баланса между требуемой функциональностью, доступной производительностью, приемлемой стоимостью и общей доступностью элементной базы. Представленный в данном проекте набор компонентов обеспечивает хорошую и надежную отправную точку для создания полнофункционального рабочего прототипа системы автоматического слежения за солнцем.

2.2 Функциональная блок-схема системы

Для наглядного представления взаимодействия всех выбранных компонентов и понимания роли каждого элемента в работе системы целесообразно составить функциональную блок-схему [26]. Такая схема представляет собой своего рода "дорожную карту" устройства, в которой отображаются ключевые функциональные блоки и направления передачи данных или управляющих сигналов между ними. Блок-схема позволяет

визуализировать общую архитектуру системы и логические взаимосвязи её частей ещё до этапа проектирования конкретных электрических соединений или написания программного кода. Это облегчает выявление возможных узких мест, упрощает отладку и помогает убедиться в целостности проектного подхода.

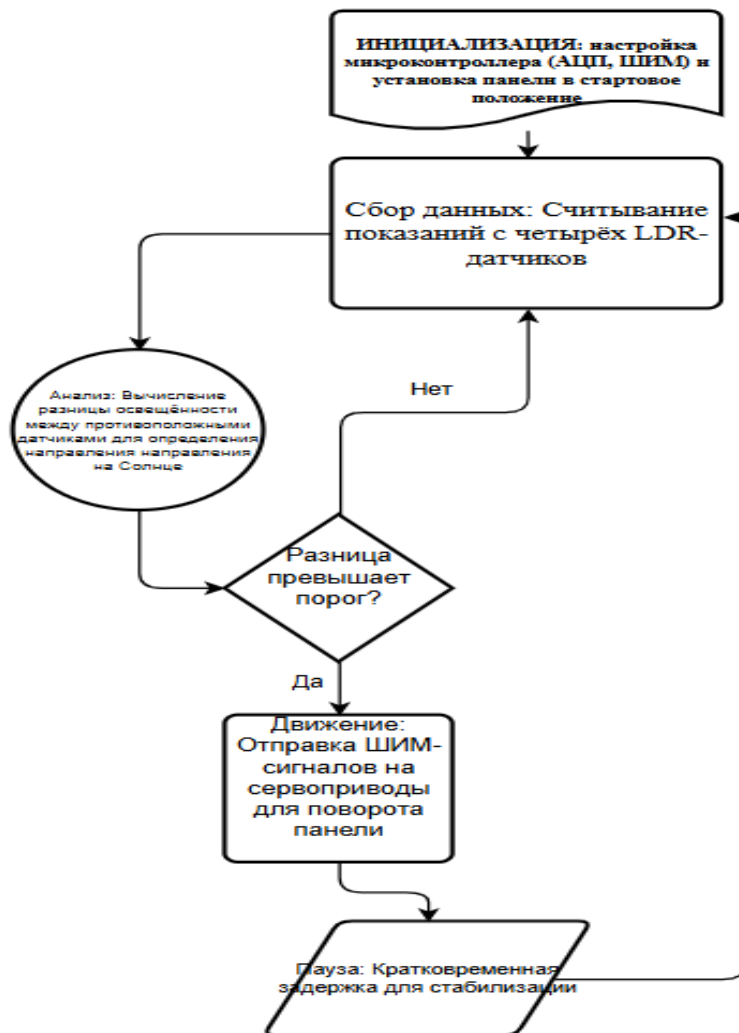


Рисунок 2.6 – Функциональная блок-схема

Анализ и принятие решений (Алгоритм управления): На основе полученных цифровых значений от фоторезистора микроконтроллер реализует заложенный в него алгоритм. Он сравнивает попарно показания датчиков, вычисляет "сигналы ошибки" или разницы. Если эти ошибки превышают заданные пороговые значения, контроллер принимает решение о необходимости коррекции положения панели. Логика может быть и более сложной, например, учитывать общую освещенность для перехода в "спящий" режим ночью [27].

Формирование управляющих воздействий:

Микроконтроллер, анализируя сигналы от фоторезисторов, вычисляет требуемые углы и направления поворота для каждого из двух сервоприводов

SG90 и генерирует соответствующие ШИМ-сигналы (широтно-импульсную модуляцию). Длительность этих импульсов строго определяет угол поворота выходного вала сервопривода. Сервоприводы (2 x SG90) выполняют роль исполнительных механизмов системы: каждый из них, получая управляющий ШИМ-сигнал от микроконтроллера, поворачивает вал на заданный угол и удерживает его, обеспечивая движение солнечной панели в вертикальной и горизонтальной плоскостях.

Механизм наклона и поворота представляет собой физическую конструкцию, включающую раму, рычаги или шарниры, с помощью которых вращательное движение сервоприводов преобразуется в нужное смещение панели по двум степеням свободы - азимуту и углу места. Источник питания системы обязан стабильно обеспечивать нужное напряжение: 3.3 В для микроконтроллера и 5 В для сервоприводов, а также иметь достаточный токовый резерв для бесперебойной работы всех компонентов, особенно в момент включения приводов.

Свет от Солнца попадает на фоторезистор. Их изменяющееся сопротивление преобразуется в напряжение, которое оцифровывается и анализируется микроконтроллером для вычисления ошибки ориентации. При значительной ошибке контроллер командует сервоприводам изменить положение панели. Новое положение панели изменяет освещенность LDR, замыкая цикл. Этот процесс повторяется, обеспечивая автоматическое слежение за Солнцем.

Такая функциональная схема позволяет четко разделить систему на логические блоки, что упрощает как разработку каждого блока в отдельности, так и понимание их взаимодействия в рамках единого целого.

2.3 Электрическая принципиальная схема

Proteus Design Suite (версия 8) - это одна из наиболее популярных систем автоматизированного проектирования (САПР), широко применяемая для разработки и отладки электронных схем. В контексте данного проекта она используется для создания и моделирования принципиальной схемы подключения микроконтроллера, фоторезисторов LDR, сервоприводов SG90 и цепей питания [28]. Программная среда предоставляет возможность проведения симуляции работы всей схемы с применением встроенных виртуальных измерительных приборов, таких как осциллограф, логический анализатор и вольтметр. Это позволяет в реальном времени отслеживать ключевые сигналы, например, уровни напряжения на входах АЦП или форму ШИМ-сигналов, подаваемых на сервоприводы. Использование Proteus значительно ускоряет процесс разработки, позволяет выявить ошибки на ранних этапах и провести предварительную отладку как аппаратной, так и программной части системы до создания физического прототипа. Такой подход существенно снижает затраты на производство, повышает надёжность конечного устройства и способствует более эффективному внедрению решений в реальную эксплуатацию.

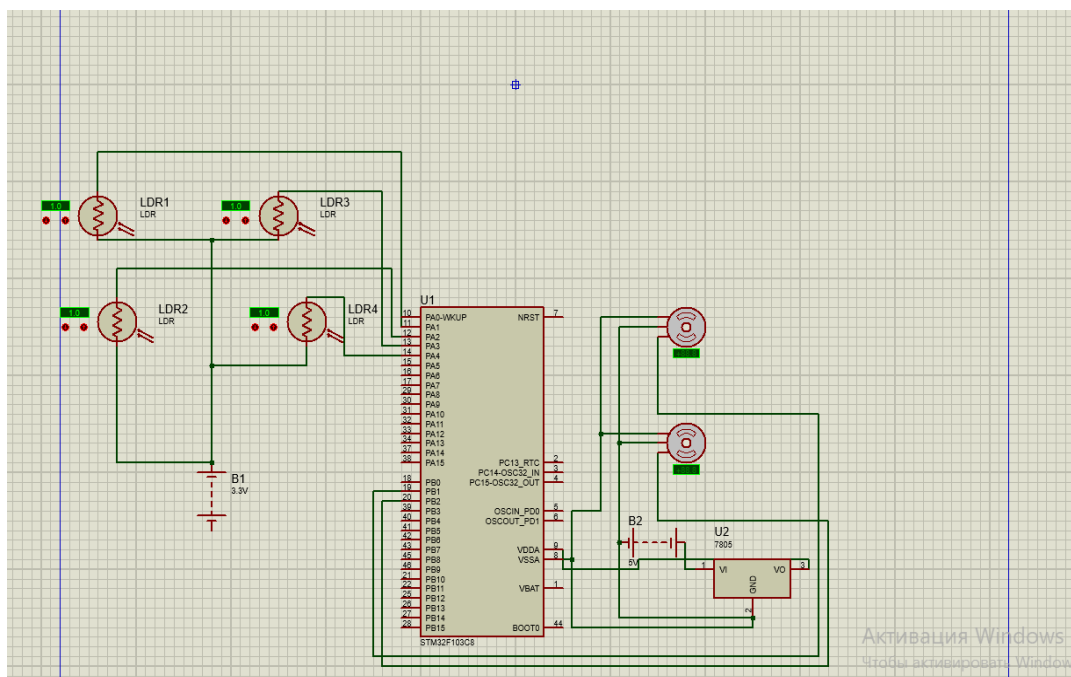


Рисунок 2.7 – Электрическая принципиальная схема

В рамках реализации проекта в среде Proteus Design Suite 8 была разработана и успешно отлажена полная электрическая принципиальная схема устройства, включающая все ключевые компоненты: микроконтроллер, фоторезисторы в качестве датчиков освещённости, сервоприводы в роли исполнительных механизмов, а также необходимые цепи питания. Работа над схемой не ограничивалась лишь её статическим проектированием - был создан полноценный виртуальный прототип, пригодный для динамического моделирования и тестирования поведения системы в условиях, приближенных к реальным.

Симуляция, выполненная в Proteus, позволила провести всестороннюю проверку корректности функционирования системы до этапа её физической реализации. Были детально проанализированы электрические сигналы в контрольных точках: напряжения на входах АЦП, форма и частота ШИМ-сигналов, реакция сервоприводов на управляющие импульсы. Эти действия подтвердили правильность схемотехнических решений и адекватность взаимодействия между аппаратной частью устройства и программной логикой микроконтроллера.

Такой подход позволил на ранней стадии выявить потенциальные ошибки и устранить их до изготовления прототипа, что существенно сократило время разработки, снизило финансовые затраты и повысило надёжность конечной конструкции. Полученные результаты стали основой для перехода к этапу сборки и испытаний физического устройства [29].

2.4 Алгоритм работы системы (с элементами математических моделей)

Алгоритм работы автоматической системы регулирования наклона солнечной панели основан на непрерывном анализе уровня освещённости, фиксируемого фоторезисторами, и динамическом управлении положением панели с помощью сервоприводов, контролируемых микроконтроллером. Основная задача системы заключается в том, чтобы на протяжении всего светового дня обеспечивать максимально перпендикулярное падение солнечных лучей на поверхность панели, что напрямую способствует повышению эффективности преобразования солнечной энергии в электрическую [30]. Управляющая логика анализирует разницу в освещённости между парно расположенными датчиками и, в случае обнаружения отклонения от оптимального положения, инициирует корректирующее движение панели до достижения равновесия сигналов, что свидетельствует о правильной ориентации относительно Солнца.

Система включает в себя следующие основные элементы:

- Микроконтроллер: **STM32F103C8T6**
- Фоторезисторы: **4 x LDR GL5528** (чувствительность: 20–90 люкс)
- Сервоприводы: **2 x SG90** (угол поворота: до 180°, крутящий момент: до 2.5 кг·см)
- АЦП: встроенный 12-битный модуль в STM32 (разрешение: 0–4095)
- Источник питания: 5 В для логики и сервоприводов

Панель может поворачиваться в двух плоскостях (горизонтальной и вертикальной) с помощью сервоприводов, обеспечивая **две степени свободы** (двуосевой трекинг). Это позволяет отслеживать как **азимутальное**, так и **зенитное** движение Солнца.

2.4.1. Сбор данных с датчиков

Четыре LDR размещаются по углам солнечной панели в форме креста (N, S, E, W), что позволяет измерять разность освещённости в двух плоскостях:

- Горизонталь (восток-запад):

$$\Delta_H = V_E - V_W$$

Вертикаль (север-юг):

$$\Delta_V = V_N - V_S$$

Четыре фоторезистора устанавливаются по углам солнечной панели в форме креста, ориентированного по сторонам света. Такое расположение позволяет системе фиксировать разность освещённости в двух взаимно перпендикулярных плоскостях - горизонтальной и вертикальной. Анализируя разницу показаний между противоположными датчиками, микроконтроллер определяет направление, в котором солнечные лучи падают с наибольшей интенсивностью, и соответственно корректирует положение панели, обеспечивая её оптимальную ориентацию по отношению к Солнцу.

2.4.2. Математическая модель управления

Регулирование положения солнечной панели осуществляется путём анализа разности напряжений, поступающих от противоположных пар фоторезисторов, и их сравнения с заранее заданным порогом - значением ϵ . Этот подход лежит в основе алгоритма управления и позволяет принимать обоснованные решения о необходимости изменения ориентации панели.

Величина ϵ представляет собой границу чувствительности системы, формируя так называемую зону нечувствительности (dead zone). Основное назначение этой зоны - исключить реакцию трекера на незначительные и кратковременные колебания уровня освещённости, вызванные, например, пролетом облаков, пылевыми завихрениями или другими локальными факторами, не требующими фактической коррекции положения панели.

Главная задача порогового значения ϵ - создание зоны нечувствительности. Эта зона необходима для обеспечения стабильности системы и предотвращения ложных срабатываний, которые могут быть вызваны незначительными и кратковременными колебаниями естественной освещённости, например, из-за движущихся облаков. Введение этого порога решает сразу несколько ключевых задач:

- Введение порогового значения ϵ позволяет избежать режима «охоты», при котором система непрерывно совершает мелкие корректирующие движения в ответ на незначительные колебания освещённости. Такие постоянные подстройки, вызванные попыткой достичь идеального баланса между датчиками, не только избыточны с точки зрения управления, но и значительно ускоряют износ механических компонентов, снижая общий ресурс и надёжность системы. Зона нечувствительности устраняет необходимость в подобных микро-движениях, обеспечивая более стабильную и предсказуемую работу солнечного трекера.

- Пороговое значение ϵ позволяет исключить избыточные и нецелесообразные движения сервоприводов, возникающие при незначительных изменениях уровня освещённости. Это существенно снижает общее энергопотребление системы, поскольку каждый поворот привода требует электрической энергии. Для автономных солнечных установок, питающихся от той же энергии, которую они вырабатывают, данное преимущество особенно важно - оно позволяет направлять большую часть энергии на полезную нагрузку, повышая общую эффективность и надёжность работы системы в условиях ограниченного энергоресурса.

Благодаря ограничению количества срабатываний за счёт зоны нечувствительности, существенно сокращается общее число рабочих циклов сервоприводов. Это напрямую влияет на продление срока их службы, так как механические компоненты - особенно в недорогих моделях, таких как имеют ограниченный ресурс по числу поворотов. Минимизация ненужных движений

способствует более надёжной и долговечной работе системы, снижая частоту технического обслуживания и вероятность отказов.

Значение эpsilon является настраиваемым параметром. В данном проекте его типичное значение подбирается в диапазоне от 100 до 200 единиц АЦП, в зависимости от конкретных условий эксплуатации и чувствительности датчиков.

Логическая реализация алгоритма

Алгоритм последовательно выполняет две логические проверки для каждой оси вращения.

1. Горизонтальное управление (Азимут)

○ Вычисляется разность напряжений между восточным (E) и западным (W) датчиками:

$$\Delta H = V_E - V_W \quad (1.1)$$

○ Затем система проверяет условие:

▪ $|\Delta H| > \epsilon \Rightarrow$ изменить азимут

○ Это означает, что если абсолютное значение разности ΔH превышает порог ϵ , микроконтроллер посылает команду на сервопривод для изменения горизонтального положения панели.

2. Вертикальное управление (Угол наклона)

○ Аналогично вычисляется разность напряжений между северным (N) и южным (S) датчиками:

$$\Delta V = V_N - V_S$$

○ Проверяется условие для вертикальной оси:

▪ $|\Delta V| > \epsilon \Rightarrow$ изменить угол наклона

○ Если абсолютное значение разности ΔV больше ϵ , сервопривод получает команду на изменение угла наклона панели.

Таким образом, перемещение панели инициируется только в случае, если разница в уровне освещённости между датчиками превышает заранее установленный порог ϵ . Такой подход позволяет системе реагировать только на действительно значимые отклонения в положении Солнца, обеспечивая точное и стабильное слежение за его движением. При этом исключается излишняя чувствительность к мелким колебаниям освещённости, вызванным внешними помехами, что повышает надёжность, снижает энергозатраты и продлевает срок службы механических компонентов.

2.4.3. Принцип ПИД-регулирования.

Для более точного и адаптивного контроля можно ввести ПИД-регулятор. Основная формула ПИД-контроля:

$$u(t) = K_p \cdot e(t) + K_i \cdot \int e(t)dt + K_d \cdot \left(\frac{de(t)}{dt} \right)$$

Где:

- $e(t)e(t)e(t)$ – текущая ошибка (например, $\Delta H \setminus \Delta H$ или $\Delta V \setminus \Delta V$)
- $K_p, K_i, K_d K_p, K_i, K_{dkp} K_i, K_d$ – коэффициенты пропорционального, интегрального и дифференциального звеньев

Для микроконтроллера STM32F103C8T6 может быть реализован дискретный ПИД-контроллер, который учитывает текущую ошибку и прошлые значения в цикле:

$$u[k] = u[k - 1] + K_p \cdot (e[k] - e[k - 1]) + K_i \cdot e[k] + K_d \cdot (e[k] - 2 \cdot e[k - 1] + e[k - 2])$$

Это позволяет добиться плавного и точного перемещения сервоприводов, особенно в условиях изменяющейся освещённости, сохраняя стабильность и предсказуемость работы системы. В то же время астрономические алгоритмы обеспечивают высокоточное вычисление положения Солнца на небосводе - в частности, зенитного и азимутального углов - на основе данных о географических координатах (широта и долгота), текущей дате и времени. Данный метод основан на математических моделях и не зависит от погодных условий или уровня облачности, что делает его особенно полезным в качестве основы для гибридных систем слежения [31].

Эти алгоритмы дают возможность с высокой точностью предсказывать траекторию движения Солнца по небосводу для любой географической точки и на любую дату в году. Благодаря этой универсальности они получили широкое распространение в солнечной энергетике - как при проектировании систем слежения, так и при оптимизации размещения солнечных панелей. Астрономические расчёты позволяют заранее определить оптимальные углы наклона и ориентации панелей, что особенно важно при строительстве стационарных установок. Кроме того, они могут использоваться в качестве эталонных значений для сопоставления с фактическими данными, поступающими от сенсоров, и служить основой для адаптивной корректировки трекеров.

Одним из наиболее точных и признанных на международном уровне является алгоритм определения положения Солнца, разработанный национальной лабораторией возобновляемой энергии США. Этот алгоритм обеспечивает исключительно высокую точность расчётов - с неопределённостью всего ± 0.0003 градуса и охватывает временной диапазон от 2000 года до нашей эры до 6000 года н.э., что делает его надёжным инструментом для долгосрочных проектов и научных исследований в области солнечной энергетики.

Основные математические формулы, используемые в таких алгоритмах, включают:

Склонение Солнца (Θ_d) - это угол между плоскостью экватора и направлением на Солнце, который изменяется в течение года. Приближенное значение вычисляется с помощью тригонометрической функции синуса. Приближенное значение вычисляется для определения положения Солнца в зависимости от времени года. Приближенное значение вычисляется как:

$$\Theta_d = 23.45 \cdot \sin\left(\frac{284 + n}{365}\right)$$

Уравнение времени (Eq_t): Используется для расчета разницы между солнечным и местным временем. Приближенные значения Eq_t (в минутах) зависят от номера дня

- a. Для n от [1 до 106] : Eq_t = 4.0 * sin(2 π ($\frac{n-k_2}{L_2}$))
- b. Для n от [107 до 166] : Eq_t = 4.0 * sin(sin(2 π ($\frac{n-k_2}{L_2}$)))
- c. Для n от [167 до 246] : Eq_t = 6.5 * sin(sin(2 π ($\frac{n-k_2}{L_2}$)))
- d. Для n от [247 до 365] : Eq_t = 16.4 * sin(sin(2 π ($\frac{n-k_2}{L_2}$)))

$$EqT = 9.87 \cdot \sin(2B) - 7.53 \cdot \cos(B) - 1.5 \cdot \sin(B)$$

Солнечное время (T_{solar}) – это время, определяемое положением Солнца относительно местного меридиана. Рассчитывается в часах:

$$T_{solar} = T_{local} + (Long_{local} - Long_{sm}) / 15$$

где T_{local} – местное гражданское время, Long_{sm} – долгота стандартного меридиана часового пояса наблюдателя (в градусах), Long_{local} – географическая долгота наблюдателя (в градусах).

Часовой угол (Θ_{hr}) – это угловое расстояние Солнца от местного меридиана, измеренное вдоль небесного экватора. Выражается в радианах:

$$\Theta_{hr} = \frac{\pi}{12} \cdot (T_{solar} - 12)$$

Зенитный угол Солнца (Θ_z) – это угол между направлением на Солнце и зенитом (точкой строго над наблюдателем). Его косинус определяется по формуле:

$$\cos(\Theta_z) = \sin(Latitude) \cdot \sin(\Theta_d) + \cos(Latitude) \cdot \cos(\Theta_d) \cdot \cos(\Theta_{hr})$$

где Latitude – географическая широта наблюдателя. Зная зенитный угол, можно легко найти и угол возвышения Солнца ($\alpha_s = 90^\circ - \Theta_z$). Азимутальный угол Солнца также рассчитывается из этих базовых параметров. Для города Алматы (Республика Казахстан), с его географическими координатами (широта $\approx 43.2433^\circ$ с.ш., долгота $\approx 76.8646^\circ$ в.д.) и часовым поясом UTC+5, эти формулы позволяют с высокой точностью составить "солнечную карту" для любого дня года. Практическая ценность астрономических алгоритмов в системах слежения многогранна: они обеспечивают точное начальное позиционирование панели на рассвете, служат эталоном для калибровки

сенсорных систем и выступают в роли надежного резервного механизма ориентации в условиях, когда показания датчиков света становятся неинформативными (например, при плотной облачности или в сумерках), гарантируя стабильную работу и предотвращая неэффективные или хаотичные перемещения трекера [32].

Применение астрономических алгоритмов в системах слежения многообразно. Они могут использоваться для:

1. Начального позиционирования панели: Утром панель может быть ориентирована на основе рассчитанного положения солнца в момент восхода.

2. Калибровки: Астрономические данные могут служить эталоном для калибровки сенсорных систем, особенно при установке.

3. Резервного механизма: В периоды, когда показания LDR-датчиков могут быть ненадежными (например, при сильной облачности), система может временно переключаться на астрономический алгоритм для поддержания приблизительно правильной ориентации. Это обеспечивает стабильность работы и предотвращает нежелательные движения.

Мощность солнечной панели
Формула: $P = V \times I$

- P – мощность панели (Вт),
- V – напряжение (В),
- I – сила тока (А).

Пояснение: Рассчитывает выходную мощность панели при оптимальном

- угле падения лучей, что обеспечивается трекером.
- с $V = 18.1$ В
- $I = 5.52$ А
- $P = 99.91$ Вт. КПД солнечной панели

Формула: $\eta = \left(\frac{P_{\text{вых}}}{P_{\text{вх}}} \right) \times 100\%$

- η – коэффициент полезного действия (%),
- $P_{\text{вых}}$ – выходная электрическая мощность (Вт),
- $P_{\text{вх}}$ – энергия солнечного излучения на площадь панели (Вт/м²).

Пояснение: Показывает долю солнечной энергии, преобразованной в электрическую (16–23%).

Энергия, выработанная за день
Формула: $E = P \times t \times k$

- E – энергия (Вт · ч),
- P – номинальная мощность панели (Вт),
- t – время солнечной активности (ч),
- k – коэффициент потерь (0.7–0.9).

Пояснение: Трекеры увеличивают время эффективной работы панели.

- Например, при $P = 100 \text{ Вт}$, $t = 6 \text{ ч}$, $k = 0.8$, $E = 480 \text{ Вт} \cdot \text{ч}$.

Угол падения солнечных лучей

$$\text{Формула: } \cos(\theta) = \sin(\delta)\sin(\varphi) + \cos(\delta)\cos(\varphi)\cos(\omega)$$

- θ – угол между лучами и панелью,
- δ – угол склонения солнца,
- φ – географическая широта,
- ω – часовой угол солнца ($15^\circ/\text{ч}$).

Пояснение: Трекеры поддерживают θ

$\approx 0^\circ$, обеспечивая максимальное поглощение энергии.

Потери из – за угла падения

$$\text{Формула: } L = 1 - \cos(\theta)$$

- L – доля потерь энергии,
- θ – угол отклонения от перпендикуляра.

Пояснение: При $\theta = 0^\circ$ потери минимальны ($L = 0$). Трекеры обеспечивают точность $\pm 5^\circ$, сохраняя до 99.6% энергии.

Годовая выработка энергии с трекером

$$\text{Формула: } E_{\text{год}} = \Sigma (P \times H_i \times k \times (1 + \Delta_{\text{трекер}}))$$

- $E_{\text{год}}$ – годовая выработка (кВт · ч),
- P – мощность панели (кВт),
- H_i – инсоляция i – го дня (кВт · ч/м²),
- k – коэффициент потерь (0.7– 0.9),
- $\Delta_{\text{трекер}}$ – прирост от трекера (0.3– 0.5 для двухосных).

2.4.4. Управление сервоприводами

Сервоприводы управляются при помощи ШИМ - сигналов, генерируемых таймерами микроконтроллеров. Частота сигнала: 50 Гц (период - 20 мс). Ширина импульса определяет угол поворота:

- $0^\circ \approx 0.5 \text{ мс}$ (duty $\approx 2.5\%$)
- $90^\circ \approx 1.5 \text{ мс}$ (duty $\approx 7.5\%$)
- $180^\circ \approx 2.5 \text{ мс}$ (duty $\approx 12.5\%$)

2.4.5. Алгоритм в программной логике

Алгоритм обеспечивает автоматическое управление наклоном

солнечной панели с целью максимального увеличения выработки электроэнергии за счет постоянного отслеживания положения Солнца. Для определения направления источника максимального освещения система использует четыре фоторезистора, установленные по углам панели [33]. Эти датчики регистрируют уровни освещенности в двух плоскостях, что позволяет точно определять отклонение панели от оптимального положения.

Двухосное позиционирование достигается с помощью двух сервоприводов SG90, которые управляются сигналами широтно-импульсной модуляции, генерируемыми микроконтроллером. Алгоритм основан на базовой логике сравнения значений из противоположных пар фоторезисторов, что позволяет определить направление, в котором требуется коррекция.

Для повышения стабильности и плавности работы можно реализовать опциональное ПИД-регулирование, чтобы минимизировать резкие изменения угла наклона. Также предусмотрен энергосберегающий режим, в котором система автоматически отключает активное управление в ночное время, когда освещенность опускается ниже заданного порога. Кроме того, алгоритм позволяет использовать астрономические расчеты положения Солнца для калибровки датчиков или работы в условиях низкой освещенности.

Псевдокод алгоритма оптимизирован с акцентом на энергоэффективность и устойчивость к внешним воздействиям, таким как переменная облачность, тени и отражения, что обеспечивает надежную и автономную работу системы в реальных условиях.

2.4.6. Энергетическая эффективность и адаптивность

Система также может быть расширена функцией ночного покоя - при низком уровне освещенности, когда все четыре LDR показывают значения менее 200–300 в цифровом выражении, система прекращает поворот панели и переходит в режим энергосбережения [34]. Кроме того, возможно дополнить алгоритм таблицей положений Солнца на основе астрономических моделей и использовать её для сверки с показаниями LDR с целью повышения точности и устойчивости системы.

2.5 3D-модель системы

После завершения разработки электронной части и алгоритмов управления солнечного трекера следующим логическим этапом становится проектирование его механической конструкции. Основная задача этого этапа - интеграция всех компонентов системы в единую конструкцию, способную обеспечивать необходимое движение солнечной панели. Для реализации этой задачи будет использовано 3D-моделирование с применением программного пакета Blender 3D. Данное приложение представляет собой мощный,

профессиональный и при этом полностью бесплатный инструмент для трёхмерного моделирования, анимации и визуализации, прекрасно подходящий для инженерного проектирования механических узлов и подготовки моделей к 3D-печати.

Создание 3D-модели позволяет решить сразу несколько критически важных задач:

- Визуализация и концептуализация. Трёхмерная модель даёт возможность увидеть устройство в сборе ещё до его физического изготовления, оценить внешний вид, габариты и компоновку всех элементов.

- Проверка на коллизии и кинематику. Моделирование движения частей конструкции помогает выявить потенциальные столкновения компонентов при поворотах и убедиться, что механизмы могут свободно перемещаться в заданном диапазоне углов.

- Точное планирование размещения компонентов. 3D-модель облегчает оптимальное расположение всех элементов системы - солнечной панели, сервоприводов, микроконтроллера, датчиков и других элементов электроники - с учётом требований к компактности, удобству сборки, защите от внешней среды и правильному распределению массы.

- Проектирование и подготовка деталей к 3D-печати. Использование Blender позволяет создавать индивидуальные детали - такие как кронштейны, держатели и корпуса - с точными размерами, соответствующими требованиям конструкции и технологии печати. Готовые модели можно экспортировать в формат, поддерживаемый 3D-принтером, что упрощает переход к изготовлению [35].

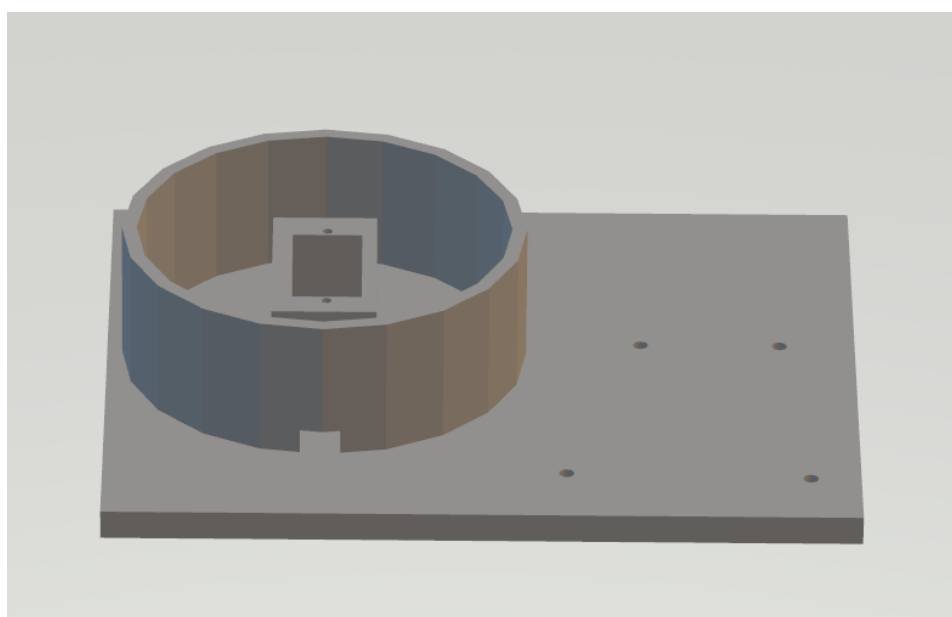


Рисунок 2.8 – Основа конструкции

Концепция механизма (двухосевой альт-азимутальный):

- Горизонтальная ось (азимут): Сервопривод SG90_Н на неподвижном основании вращает платформу/кронштейн (до $180^{\circ}+$).

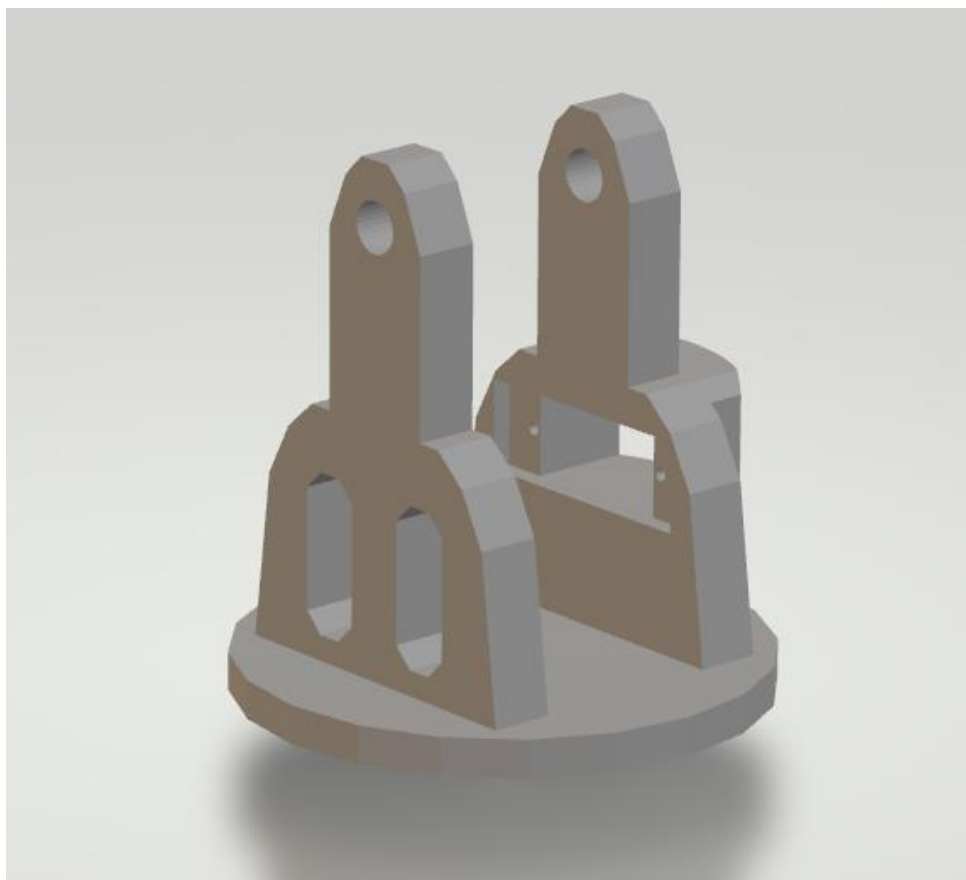


Рисунок 2.9 – Каркас конструкции

- Вертикальная ось (угол места/элевация): Второй сервопривод SG90_V, установленный на поворотной платформе (ось перпендикулярна первой), наклоняет U/L-образную раму с солнечной панелью.
- Солнечная панель: Крепится к U-образной раме.
- Датчики LDR: Размещаются по периметру панели или на выступах ее рамы.

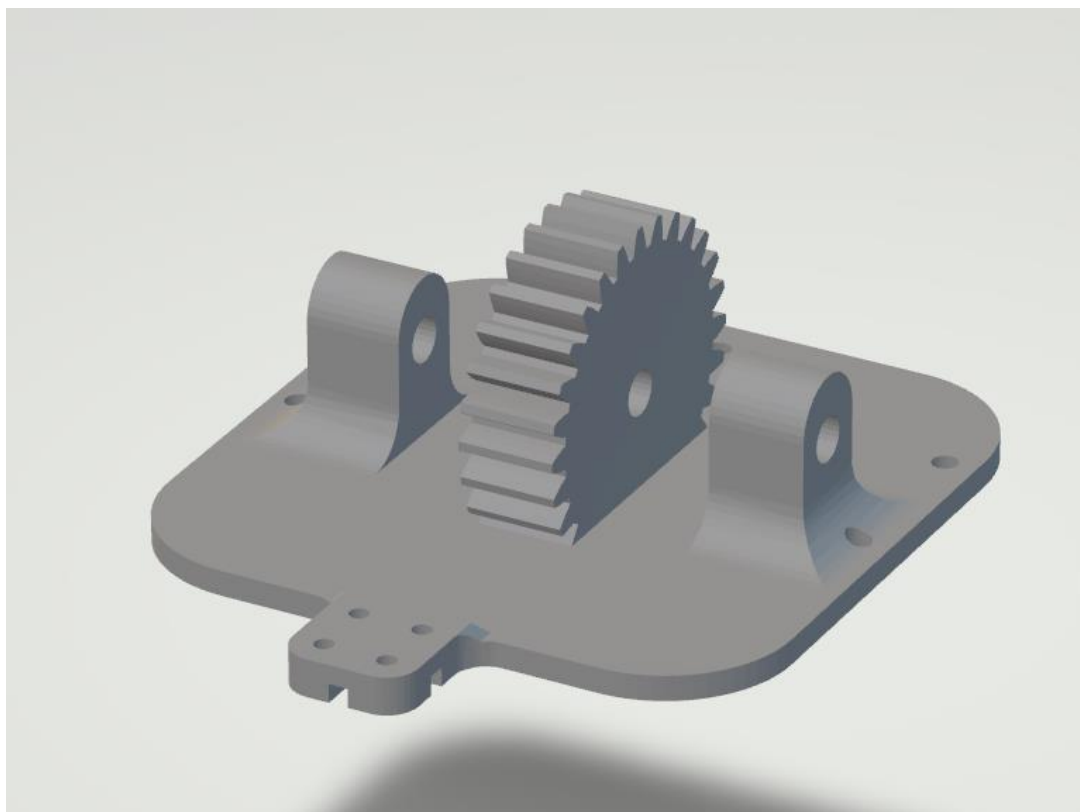


Рисунок 2.10 – Поворотный механизм для солнечной панели

Использование Blender 3D

- В Blender создается не только статичная 3D-модель, но и настраивается "арматура" (кости) и ограничения для имитации движения сервоприводов и проверки кинематики системы. Это позволяет выявлять коллизии и заклинивания. Детали для 3D-печати экспортируются в .stl и подготавливаются в слайсере.

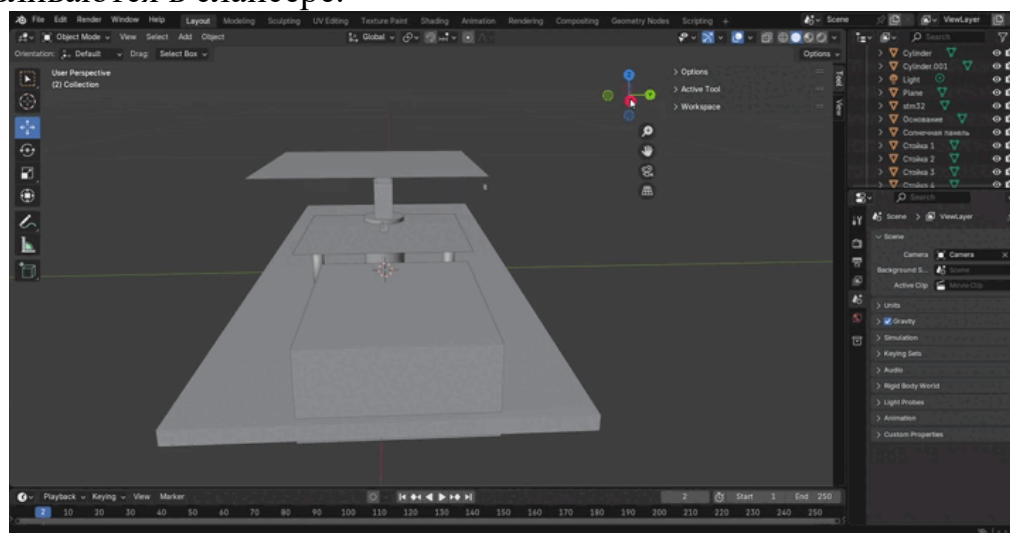


Рисунок 2.11 - Кадр анимации движения панели из Blender.

Важно отметить, что в проекте используются два взаимодополняющих инструмента: Proteus 8 и Blender 3D, каждый из которых играет ключевую роль на своём этапе разработки. Proteus 8 применяется для проектирования и симуляции электрической принципиальной схемы, определяя состав компонентов, их функциональные связи и проверку корректности взаимодействия. В то же время Blender 3D служит для проектирования и визуализации физической, механической части устройства, позволяя продумать конструкцию, компоновку и кинематику элементов.

Совместное использование этих программных решений обеспечивает комплексный подход: электрическая схема задаёт, какие элементы будут использоваться и как они связаны, а 3D-модель позволяет увидеть, где и как эти элементы будут размещены на конструкции, как они будут двигаться и взаимодействовать между собой.

Значение 3D-моделирования трудно переоценить: создание продуманной и реалистичной модели позволяет на раннем этапе выявить потенциальные конструктивные ошибки, избежать лишних затрат на материалы, упростить сборку устройства и ускорить переход к изготовлению прототипа. Кроме того, визуальные материалы - эскизы, рендеры и проекции - будут включены в диссертацию и её приложения, наглядно иллюстрируя как технические решения, так и общий подход к проектированию.

3.СБОРКА И ПЕРВИЧНЫЕ ИСПЫТАНИЯ ПРОТОТИПА СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ НАКЛОНА СОЛНЕЧНОЙ ПАНЕЛИ

3.1 Изготовление и сборка прототипа

После детального планирования нашей системы во второй главе, где мы определились со всеми компонентами, разработали электрические схемы и даже создали трехмерную модель будущего устройства, наступил наиболее захватывающий этап - воплощение теоретических разработок в реально функционирующий прототип. В данной главе будет подробно описан процесс сборки нашего солнечного трекера, включая те сложности, с которыми пришлось столкнуться, и пути их решения. Далее мы расскажем о первом запуске системы, проверке ее отклика на управляющие команды и соответствия ее поведения ожидаемому функционалу.

- Процесс создания солнечного трекера можно условно разделить на два основных этапа: сборку механической конструкции, обеспечивающей ориентацию панели, и монтаж электронных компонентов, осуществляющих управление этим процессом.

- Механическая сборка: Основной задачей на данном этапе являлось создание легкой, но достаточно прочной конструкции, способной обеспечивать двухосевое движение небольшой солнечной панели с использованием двух сервоприводов. Учитывая цели быстрого прототипирования, минимизации затрат и возможности легкого внесения модификаций, было принято решение об активном использовании технологии 3D-печати для изготовления большинства кастомных деталей.

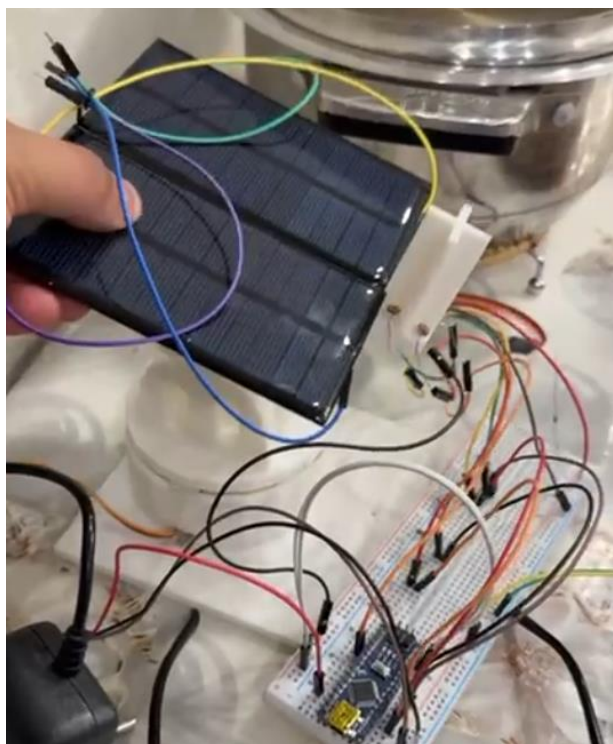


Рисунок 3.1 – Собранный макет

Проектирование деталей в Blender 3D: В соответствии с планом, изложенным во второй главе (п. 2.6), все уникальные элементы механической конструкции солнечного трекера были тщательно проработаны и предварительно смоделированы в среде Blender 3D. К ним относятся: основная рама, поворотная платформа для реализации азимутального движения, U-образный кронштейн, служащий для крепления солнечной панели и обеспечения её наклона по углу места, а также специальные держатели для фоторезисторов, размещённых по углам панели.

При проектировании особое внимание уделялось нескольким важным аспектам: учёту габаритов всех компонентов, точному размещению крепёжных отверстий, обеспечению свободного перемещения движущихся элементов без трения или заеданий, а также минимизации веса конструкции при сохранении достаточной прочности и устойчивости. Например, держатели для LDR были оснащены компактными козырьками, позволяющими создавать направленную тень на датчики. Это решение позволяет усилить разницу в освещённости между противоположными датчиками при отклонении панели от положения, перпендикулярного солнечным лучам, тем самым улучшая точность и чувствительность системы к угловому смещению. 3D-печать деталей: После завершения 3D-моделирования и проверки на виртуальные коллизии, модели были экспортированы и подготовлены к печати с использованием программы - слайсера. В качестве материала для печати был выбран ПЛА - пластик, обладающий достаточной прочностью для прототипа, простотой в печати и являющийся экологичным материалом. Процесс печати занял определенное время (несколько часов на каждую крупную деталь), обеспечив получение элементов с высокой точностью соответствия проекту [36]. Последующая постобработка включала удаление поддерживающих структур (при их наличии), зачистку кромок и, в некоторых случаях, калибровку диаметра крепёжных отверстий.

Сборка основного механизма:

Первый сервопривод, отвечающий за азимутальный поворот (горизонтальное движение), был установлен на неподвижное основание (изготовленное методом 3D-печати или из листового материала, такого как фанера или пластик). Поворотная платформа была закреплена на его валу через стандартную качалку, входящую в комплект поставки SG90.

Затем на поворотную платформу был смонтирован второй сервопривод SG90, ось вращения которого была ориентирована перпендикулярно оси первого сервопривода. Данный сервопривод предназначен для управления наклоном панели по углу места (вертикальное движение).

К валу второго сервопривода был прикреплен U-образный кронштейн (или два L-образных рычага), на котором непосредственно фиксировалась малогабаритная солнечная панель с использованием стандартных метизов (болтов и гаек). Обеспечивалось надежное крепление панели для предотвращения вибраций, избегая при этом ее повреждения.

Держатели с фоторезисторами LDR были закреплены по углам

солнечной панели или на специально предусмотренных выступах рамы таким образом, чтобы обеспечить их ориентацию в различных направлениях (вверх, вниз, влево, вправо) относительно центральной оси панели.

Общие моменты и возникшие трудности:

Конечно, не все шло гладко с первого раза. Например, при 3D-печати иногда приходилось подбирать параметры (температуру, скорость), чтобы детали получались прочными и точными. При сборке механики важно было добиться, чтобы все двигалось легко, без заеданий – иногда приходилось немного расширять отверстия или смазывать оси [37]. С электрикой главной задачей было не перепутать провода, особенно питание и землю, чтобы ничего не сжечь. Также важно было обеспечить надежный контакт во всех соединениях, особенно на макетной плате. Из инструментов нам понадобились: паяльник (для некоторых соединений), мультиметр (проверять напряжения и прозванивать цепи), набор маленьких отверток и ключей, кусачки, пинцет, и, конечно, компьютер с установленными программами (Blender, Cura, STM32CubeIDE, Proteus).

В целом, этап изготовления и сборки прототипа – это очень увлекательный процесс, когда из отдельных деталей и идей рождается что-то работающее. Он требует терпения, аккуратности и готовности исправлять ошибки.

3.2 Испытание на работоспособность

После того как наш солнечный трекер был собран, наступил момент истины – проверка его работоспособности. На этом этапе мы еще не гнались за точными цифрами эффективности, а хотели убедиться, что все основные узлы функционируют правильно и система в целом "живая". Тестирование проводилось в несколько этапов.

1. Проверка механической части:

Плавность и диапазон хода: Мы вручную (очень аккуратно, чтобы не сломать редукторы сервоприводов) или подавая тестовые ШИМ-сигналы с контроллера, проверили, насколько плавно солнечная панель поворачивается по обеим осям. Убедились, что нет заклиниваний, скрипов или чрезмерных люфтов в соединениях. Проверили, достигается ли полный запланированный диапазон углов поворота и наклона, и не упирается ли конструкция во что-либо на крайних положениях. Если находились какие-то проблемы, механика дорабатывалась (например, подтачивались детали, укреплялись соединения).

Устойчивость конструкции: Проверили, насколько устойчиво стоит вся конструкция, не шатается ли она, выдержит ли вес солнечной панели при различных углах наклона.

2. Проверка электронной части и отдельных компонентов:

Питание: С помощью мультиметра мы проверили напряжения питания на всех ключевых точках схемы: на выводах микроконтроллера (должно быть 3.3В), на линии питания сервоприводов (около 5В), на делителях напряжения LDR. Убедились, что нет коротких замыканий.

Работа фоторезистора: Мы написали простую тестовую программу, которая считывала значения с АЦП по четырем каналам, к которым подключены, и выводила эти значения в последовательный порт на компьютер. Затем мы поочередно закрывали рукой каждый фоторезистор или светили на него фонариком и смотрели, как меняются показания. Это позволило убедиться, что все фоторезисторы работают, правильно подключены, и схема делителя напряжения функционирует корректно (значения АЦП адекватно реагируют на изменение освещенности).

Работа сервоприводов: Написали еще одну тестовую программу, которая позволяла по командам с компьютера (через тот же последовательный порт) или просто циклически изменять угол поворота каждого сервопривода от минимального до максимального значения. Мы наблюдали за движением сервоприводов, проверяли, что они поворачиваются на ожидаемые углы, и что ШИМ-сигналы генерируются правильно (это можно было бы проверить и осциллографом, если бы возникли сомнения, посмотрев форму и длительность импульсов). Также проверили, что сервоприводы удерживают заданное положение под небольшой нагрузкой (например, от веса панели).

3. Проверка базового алгоритма слежения (в лабораторных условиях):

После того как мы убедились, что все компоненты по отдельности работают, мы загрузили в STM32 основную программу с алгоритмом слежения (описанным в п. 2.4) и приступили к "оживлению" всей системы. Эти первые тесты проводились в помещении, используя в качестве "Солнца" обычную настольную лампу или мощный фонарик.

Реакция на источник света: Мы направляли свет от лампы на солнечную панель с разных сторон и наблюдали, как система реагирует. Если свет падал, например, больше слева, панель должна была повернуться влево. Если свет был выше – панель должна была наклониться вверх. Мы проверяли, что движение происходит в правильном направлении по обеим осям.

Достижение равновесия: Когда источник света оказывался прямо перед панелью (так, что все LDR освещались примерно одинаково), система должна была остановиться. Мы проверяли, насколько точно она "нацеливается" и не "проскакивает" ли она оптимальное положение.

Работа "мертвой зоны": Мы изменяли значения порогов чувствительности в программе и смотрели, как это влияет на поведение системы. При слишком маленьких порогах система могла постоянно "дрожать", реагируя на малейшие флуктуации света. При слишком больших – она становилась "ленивой" и не реагировала на небольшие отклонения источника света. Нашей задачей было найти некий компромисс.

Стабильность работы: Мы оставляли систему работать на некоторое время, наблюдая, нет ли каких-то сбоев, не "зависает" ли программа, не перегреваются ли компоненты.

Методика и инструменты тестирования:

Компьютер с установленной средой STM32CubeIDE (для загрузки прошивок и отладки) и программой для мониторинга последовательного порта (например, Termite, PuTTY или встроенный монитор в Arduino IDE, если бы

мы использовали его для вывода отладочной информации).

Программатор ST-Link V2 для загрузки кода в STM32.

Мультиметр для проверки напряжений и целостности цепей.

Настольная лампа или фонарик в качестве имитатора Солнца.

Осциллограф (если бы возникла необходимость детально проверить форму ШИМ-сигналов или другие электрические параметры).

Эти первые испытания на работоспособность очень важны. Они позволяют выявить и исправить многие ошибки в сборке, подключении или в самой логике программы еще до того, как мы вынесем трекер на улицу для настоящих "полевых" испытаний под реальным Солнцем. Успешное прохождение этих тестов дает уверенность, что наш прототип готов к более серьезным проверкам.

3.3 Рассуждение о выбранных моделях

Теперь, когда наш солнечный трекер собран и прошел первые тесты на работоспособность, можно немного остановиться и подумать: а насколько удачным оказался наш первоначальный выбор компонентов, конструкции и базового алгоритма? Что получилось хорошо, а что, возможно, стоило бы сделать по-другому, если бы мы начинали сейчас? Это своего рода рефлексия, основанная на первых практических шагах.

1. Выбор микроконтроллера полностью себя оправдал. Его производительности и объема памяти хватило для реализации алгоритма, обработки данных с четырех АЦП и генерации двух ШИМ-сигналов. Наличие большого количества легко настраиваемых таймеров и каналов АЦП оказалось очень удобным. Среда STM32CubeIDE и библиотеки HAL, после освоения, позволили быстро писать и отлаживать код. Главным было разобраться с настройкой тактирования и периферии. Некоторое неудобство доставила разводка пинов на компактной плате, что потребовало использования проводов-перемычек, но это приемлемо для прототипа.

Сервоприводы справились с задачей позиционирования легкой солнечной панели в рамках малогабаритного прототипа, обеспечивая ее поворот и удержание положения. Тем не менее, в ходе эксплуатации проявились их конструктивные ограничения: наличие заметного люфта в пластиковом редукторе и характерный акустический шум при реверсе направления движения. Точность позиционирования данных сервоприводов не является идеальной, однако для LDR-трекера, функционирующего по принципу дифференциального сравнения освещенности ("больше-меньше"), это оказалось не критичным. Ключевыми факторами их выбора стали низкая стоимость и широкая доступность. Для масштабирования системы под более крупные и тяжелые панели, или при требованиях повышенной точности и скорости, сервоприводы SG90 не являются оптимальным решением; в таких случаях целесообразно рассмотреть использование более мощных моделей с металлическим редуктором (например, MG995/MG996R) или шаговых

двигателей.

Фоторезисторы были выбраны в качестве светочувствительных элементов благодаря своей простоте и низкой стоимости. Они адекватно реагируют на изменение уровня освещенности, а реализация схемы делителя напряжения для их сопряжения с микроконтроллером не представляет сложности. Однако в ходе практического применения проявилась их известная инерционность, заключающаяся в некоторой задержке изменения сопротивления при флуктуациях светового потока. Этот фактор требует учета при разработке алгоритма управления, особенно в условиях быстро меняющейся облачности. Также следует отметить потенциальную вариабельность характеристик между отдельными экземплярами фоторезистора и их температурную зависимость, что для прецизионных систем могло бы потребовать индивидуальной калибровки или применения более стабильных фотодатчиков, таких как фотодиоды. Тем не менее, для задачи определения общего направления на источник максимальной освещенности, фоторезисторы оказались вполне пригодными [10].

2. Оправданность выбранной механической конструкции (на основе 3D-модели):

Применение технологии 3D-печати для изготовления механических компонентов прототипа оказалось эффективным решением на этапе прототипирования. Это обеспечило возможность быстрого создания деталей требуемой геометрии, гибкость при внесении конструктивных изменений (посредством коррекции 3D-модели и повторной печати) и получение относительно легкой конструкции. Реализованная альт-азимутальная схема с двумя сервоприводами, в целом, обеспечила требуемое двухосевое движение.

Однако в ходе сборки и первичных испытаний выявилась необходимость более тщательного проектирования соединительных узлов для повышения общей жесткости конструкции и минимизации люфтов. Для более крупных конструкций целесообразно было бы рассмотреть применение подшипников в осях вращения. Важным аспектом при использовании сервоприводов является обеспечение преимущественно радиальной нагрузки на вал, избегая значительных осевых и изгибающих моментов. Несмотря на попытки учесть это в прототипе, для более серьезных конструкций потребовались бы более продуманные механические решения.

Размещение фоторезисторов на выступающих элементах, оснащенных козырьками, подтвердило свою эффективность в создании более выраженного градиента освещенности между датчиками. Тем не менее, было установлено, что прецизионное позиционирование и юстировка данных сенсорных элементов являются критически важными факторами для обеспечения стабильности функционирования системы слежения.

Оправданность базового алгоритма слежения:

Применение алгоритма, основанного на сравнении сигналов с четырех фоторезисторов и последующей пошаговой коррекции положения сервоприводов, продемонстрировало достаточную простоту реализации на микроконтроллере STM32. Интуитивно понятная логика, такая как "если

слева ярче – поверни налево", легко программируется.

Однако, уже на этапе первичного тестирования с использованием искусственного источника света были выявлены его ограничения. Подбор порогов чувствительности и величины шага коррекции представляет собой сложную оптимизационную задачу. Слишком низкие значения порогов приводят к осцилляциям системы ("дрожанию") и избыточному энергопотреблению, в то время как завышенные пороги снижают чувствительность системы к небольшим смещениям источника света. Величина шага коррекции также оказывает существенное влияние: малый шаг замедляет реакцию, а большой шаг может привести к перерегулированию и колебаниям вокруг оптимального положения.

Стало очевидно, что простой релейный регулятор с фиксированным шагом не всегда является оптимальным решением. В качестве возможного усовершенствования можно рассмотреть реализацию пропорционального регулятора, в котором величина шага коррекции пропорциональна величине ошибки. Такой подход потенциально способен обеспечить более плавное и быстрое слежение.

Также возникли вопросы относительно поведения системы в реальных условиях эксплуатации: при переменной облачности, наличии рассеянного света, а также на восходе и закате, когда Солнце находится низко над горизонтом. Предполагается, что простой фоторезистор - алгоритм в таких условиях может демонстрировать сбои. В связи с этим, перспективным направлением является анализ больших объемов данных о работе системы, собранных в ходе экспериментов, с использованием фреймворка TensorFlow. Это может помочь выявить скрытые закономерности и разработать улучшенную, более адаптивную логику управления.

В целом, этап сборки и первичных испытаний прототипа можно оценить положительно. Солнечный трекер продемонстрировал работоспособность, адекватно реагируя на источник света и осуществляя позиционирование в заданном направлении. Выбранная элементная база, несмотря на бюджетный характер, позволила реализовать основной функционал, запланированный для прототипа. Использование технологии 3D-печати для создания механических компонентов обеспечило удобство сборки и возможность внесения конструктивных модификаций.

Тем не менее, очевидно, что это лишь начальный этап разработки. Базовый алгоритм управления требует дальнейшей тонкой настройки и, вероятно, существенного усовершенствования. Механическая часть для применения в условиях, выходящих за рамки лабораторного прототипа, нуждалась бы в усилении конструкции. Важно отметить, что именно эти первые практические шаги наглядно продемонстрировали области, в которых применение более интеллектуальных подходов к управлению, в частности с использованием фреймворка TensorFlow, может быть наиболее целесообразным. Собранный прототип представляет собой ценную экспериментальную платформу для проведения дальнейших исследований и сбора данных, необходимых для обучения и верификации таких "умных"

алгоритмов.

Этап сборки и первичного тестирования неизбежно является моментом столкновения теоретических предпосылок с практическими реалиями, и зачастую в ходе этого процесса выявляется множество нюансов, не учтенных на стадии проектирования. Однако именно преодоление этих вызовов и составляет суть и привлекательность инженерной деятельности.

3.4 Принцип работы TensorFlow Lite Micro

Принцип работы TensorFlow Lite Micro (TFLM) основан на интерпретации специально подготовленной модели машинного обучения в формате FlatBuffer. Этот процесс включает несколько ключевых этапов и компонентов, которые взаимодействуют для выполнения вывода (inference) на микроконтроллере [38].

1. Модель в формате .tflite (FlatBuffer): Все начинается с модели, обученной с использованием TensorFlow. Эта модель затем конвертируется в формат TensorFlow Lite (.tflite). Данный формат использует FlatBuffers – эффективную кроссплатформенную библиотеку сериализации. FlatBuffers позволяет получить доступ к данным без предварительного разбора (парсинга) или копирования, что критически важно для устройств с ограниченной памятью и производительностью. Модель .tflite содержит граф вычислений (последовательность операций), веса модели и метаданные. Для использования в TFLM, этот бинарный .tflite файл обычно преобразуется в C-массив (например, с помощью утилиты xxd), который компилируется вместе с кодом прошивки.

2. Ключевые компоненты библиотеки TFLM:

Model (tflite::Model): Этот объект создается из C-массива, представляющего .tflite модель. Он обеспечивает доступ к структуре модели (операциям, тензорам, подграфам), хранящейся в памяти программ (Flash). TFLM читает структуру модели непосредственно из этого представления.

ErrorReporter (tflite::ErrorReporter): Простой интерфейс для вывода отладочной информации и сообщений об ошибках. Реализация этой функции платформенно-зависима; например, на STM32 она может выводить сообщения через UART.

MicroOpResolver (чаще **MicroMutableOpResolver**) (**tflite::MicroMutableOpResolver**): Этот компонент отвечает за сопоставление операций, указанных в модели, с их конкретными реализациями (ядрами) в коде TFLM. Разработчик регистрирует в нем только те операции, которые действительно используются в модели, чтобы минимизировать размер кода. TFLM поставляется с набором стандартных ядер, а также поддерживает оптимизированные ядра (например, из CMSIS-NN) и пользовательские операции [39].

MicroInterpreter (tflite::MicroInterpreter) TFLM Он управляет всем процессом вывода.

3. Управление памятью – Tensor Arena: TFLM не использует динамическое выделение памяти (malloc, free). Вместо этого разработчик должен выделить один большой статический буфер памяти, называемый tensor arena. MicroInterpreter использует этот буфер для хранения входных, выходных и промежуточных тензоров, необходимых для вычислений. Размер tensor arena должен быть достаточным для конкретной модели. Для его определения используются специальные инструменты или экспериментальный подбор. MicroAllocator – компонент интерпретатора, отвечающий за планирование и распределение памяти внутри tensor arena. Он использует стратегию, такую как GreedyMemoryPlanner, чтобы эффективно размещать тензоры и минимизировать общий требуемый объем памяти. Tensor arena делится на секции: Head (для неперсистентных буферов тензоров), Tail (для персистентных данных) и Temporary (для кратковременных выделений).

4. Процесс вывода (Inference):

Инициализация: Создаются экземпляры ErrorReporter, Model, MicroMutableOpResolver (с зарегистрированными операциями). Затем создается MicroInterpreter, которому передаются эти объекты и указатель на tensor arena.

Выделение тензоров: Вызывается метод interpreter->AllocateTensors(). На этом этапе MicroAllocator анализирует граф модели и распределяет память из tensor arena для всех необходимых тензоров. Если памяти недостаточно, будет возвращена ошибка.

Получение указателей на входные/выходные тензоры: Доступ к входному тензору получается через interpreter->input(0) (для первого входа), а к выходному – через interpreter->output(0). Данные для обработки (например, от датчиков) копируются во входной тензор.

Запуск вывода: Вызывается метод interpreter->Invoke(). Интерпретатор последовательно выполняет операции модели, определенные в графе. Для каждой операции он находит соответствующее ядро с помощью MicroOpResolver и вызывает его функцию Eval (или Invoke в TfLiteRegistration). Ядра читают данные из своих входных тензоров и записывают результаты в выходные тензоры, используя память из tensor arena.

Получение результатов: После успешного завершения Invoke(), результаты вывода считываются из выходного тензора.

Таким образом, TFLM обеспечивает выполнение моделей МО путем тщательного управления ресурсами, статического выделения памяти и интерпретации компактного представления модели, что делает его идеальным решением для микроконтроллеров [40].

3.5 TensorFlow Lite Micro с STM32

Интеграция TensorFlow Lite Micro (TFLM) с микроконтроллерами STM32, такими как STM32F103C8T6, представляет собой процесс, сочетающий стандартные возможности TFLM с инструментами и экосистемой STMicroelectronics. STM32F103C8T6, основанный на ядре Arm Cortex-M3 (до

72 МГц, 64 КБ Flash, 20 КБ SRAM), является популярным выбором для многих встраиваемых проектов благодаря своей доступности и производительности, достаточной для несложных задач машинного обучения.

Ручная интеграция библиотеки TFLM:

Процесс:

1. Сборка TFLM: Исходный код TFLM (из репозитория TensorFlow) компилируется для целевой архитектуры (Cortex-M3). Обычно это делается с помощью make или CMake, указывая TARGET=cortex_m_generic (или более специфичный, если доступен) и, возможно, OPTIMIZED_KERNEL_DIR=cmsis_nn для использования CMSIS-NN.

2. Добавление в проект STM32: Скомпилированная библиотека TFLM (или ее исходные файлы, если собирается как часть проекта) добавляется в проект STM32 (например, в STM32CubeIDE). Это включает копирование директорий tensorflow и third_party (содержащей зависимости, такие как FlatBuffers, KissFFT) и настройку путей включения (include paths) и символов препроцессора в IDE.

3. Написание кода приложения: Разработчик вручную пишет код для инициализации ErrorReporter, Model (из C-массива модели), MicroMutableOpResolver, MicroInterpreter, выделения tensor arena и вызова AllocateTensors() и Invoke().

Преимущества: Полный контроль над версиями, возможность тонкой настройки, лучшее понимание работы TFLM.

Недостатки: Более сложный процесс настройки, требует глубокого понимания TFLM и системы сборки.

4. Анализ производительности и технико-экономических параметров фотоэлектрической системы в условиях города Алматы

4.1 Методология моделирования и исходные параметры

Исследование производительности фотоэлектрической системы (ФЭС) выполнено с использованием программного комплекса PVsyst. [41]. Объектом моделирования являлась ФЭС, расположенная в г. Алматы, Казахстан (43.236...° N, 76.933...° E, высота 859 м).

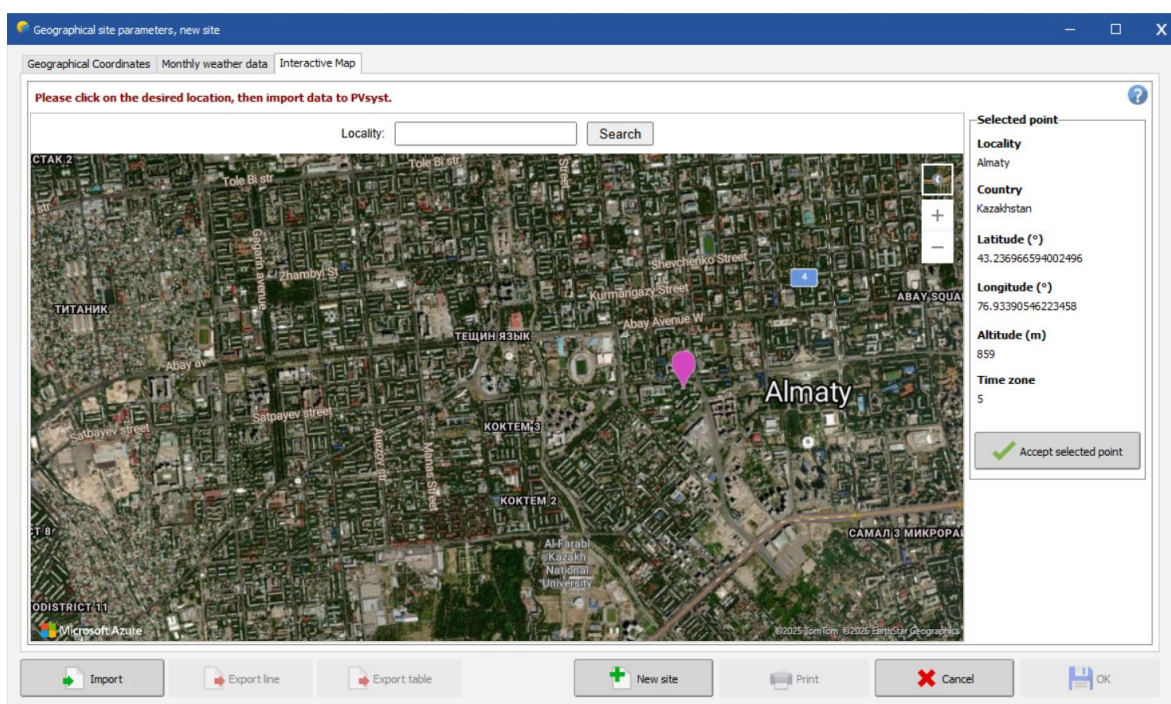


Рисунок 1: Географические параметры объекта

Метеорологические данные для анализа получены из интегрированной базы данных PVsyst – Meteonorm 8.2 (валидность данных до 2025 г.).

Geographical site parameters for Almaty_MN82mod.SIT (under modification)

Geographical Coordinates | Monthly weather data | Interactive Map

Site: **Almaty (Kazakhstan)**

Data source: **Meteonorm 8.2 (2025), Sat=100% (Aibek Tugebay)**

	Global horizontal irradiation kWh/m ² /month	Horizontal diffuse irradiation kWh/m ² /month	Temperature °C	Wind Velocity m/s	Linke turbidity [-]	Relative humidity %
January	46.1	17.5	-6.2	1.39	3.055	80.0
February	67.7	36.9	-3.9	1.59	3.469	80.3
March	104.7	49.0	5.4	1.90	4.306	70.2
April	128.0	72.3	11.8	2.20	4.836	62.1
May	172.9	67.9	17.6	2.18	4.255	55.2
June	178.4	88.8	22.0	2.09	4.135	51.0
July	194.9	79.0	24.6	2.10	3.926	45.4
August	171.0	76.7	23.3	2.01	3.660	44.2
September	133.8	52.0	17.4	1.89	3.617	49.4
October	89.1	43.8	10.0	1.61	3.771	64.6
November	47.4	29.3	2.3	1.60	3.406	75.9
December	37.0	21.3	-4.2	1.50	2.976	82.7
Year	1372.0	634.6	10.0	1.8	3.784	63.4

Global horizontal irradiation year-to-year variability 6.4%

Рисунок 2: Таблица с ежемесячными данными для Алматы

Ключевые годовые климатические показатели для г. Алматы: суммарная горизонтальная солнечная радиация (GHI) – 1372.0 кВт·ч/м²; диффузная горизонтальная радиация (DHI) – 634.6 кВт·ч/м² (доля DHI $\approx$ 46.25%); среднегодовая температура воздуха – 10.0 °C (диапазон среднемесячных от - 6.2 °C до +24.6 °C); среднегодовой коэффициент мутности атмосферы Линке – 3.784.

Конфигурация моделируемой ФЭС:

- Тип фотоэлектрических модулей (ФЭМ): монокристаллический кремний
- Номинальная мощность (DC): 1.2 кВт
- Общая площадь модулей: 8 м²
- Ориентация: стационарная установка, угол наклона 20° к горизонту, азимут 0° (юг).
- Модель затенения: идеализированный плоский горизонт (без учета объектов затенения).

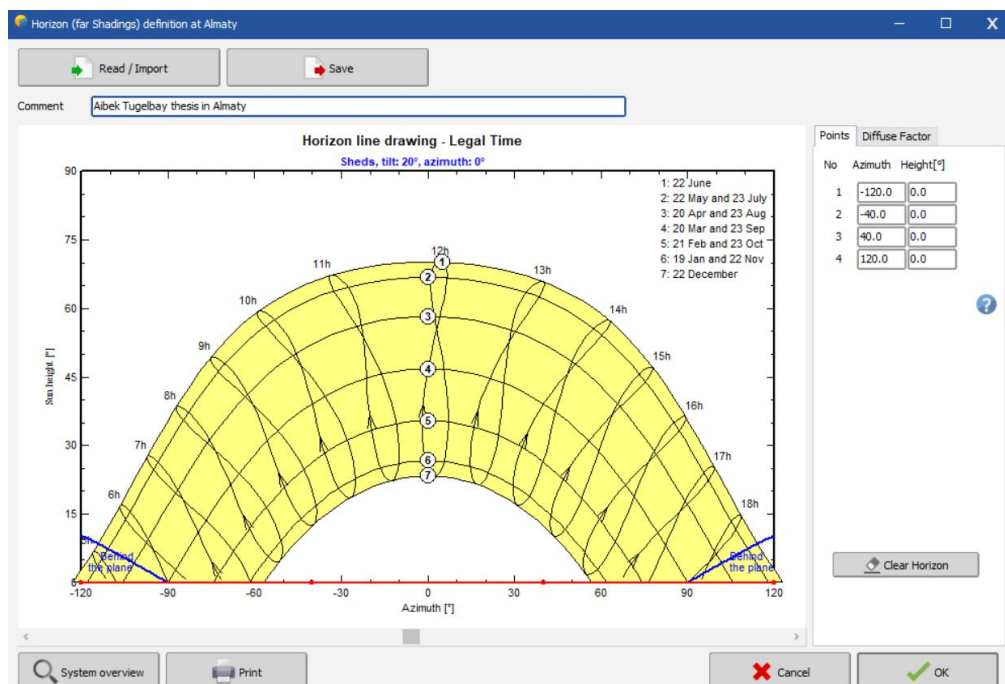


Рисунок 3: Определение горизонта (для затенения) в Алматы - схема траекторий солнечных лучей с линией горизонта.

4.2. Результаты моделирования энергетической производительности

4.2.1. Инсоляция на рабочую поверхность модулей

Суммарное годовое поступление солнечной радиации на наклонную плоскость модулей для заданной конфигурации составило $3.76 \text{ кВт} \cdot \text{ч}/\text{м}^2/\text{день}$, что эквивалентно $1372.4 \text{ кВт} \cdot \text{ч}/\text{м}^2$ в год. Данное значение численно совпадает со среднегодовой GHI, что указывает на незначительное влияние угла наклона 20° на суммарное годовое поступление радиации, но предполагает оптимизацию ее сезонного распределения.

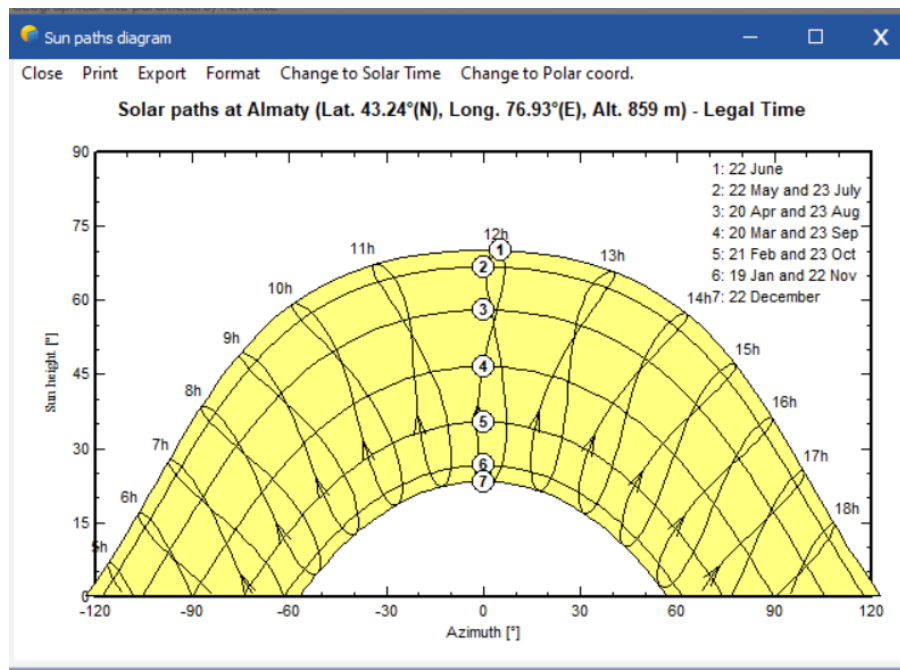


Рисунок 4: Схема солнечных путей в Алматы

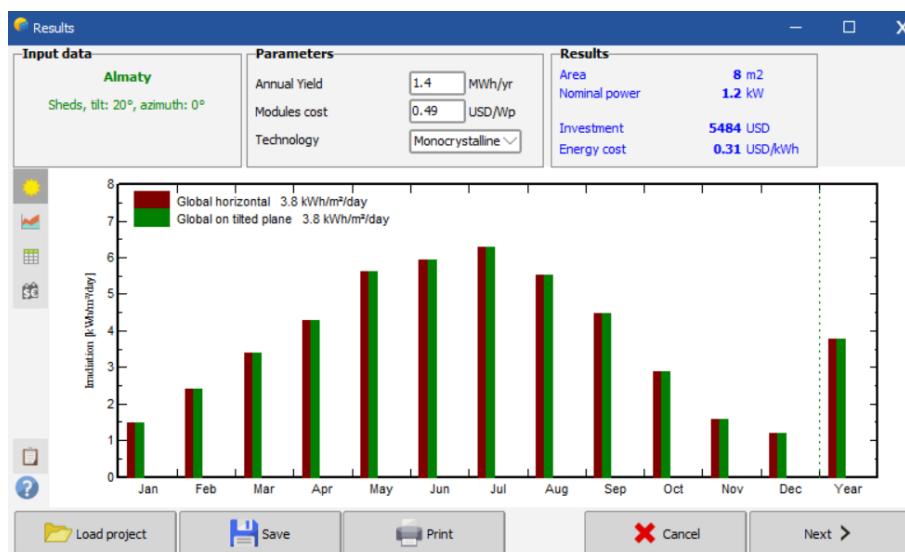


Рисунок 5: Результаты - Входные данные, параметры, результативность облучения, кВт*ч/м²/день

4.2.2. Выработка электроэнергии

Годовая выработка электроэнергии переменного тока (ЕАС) системой составила 1400 кВт·ч.

Удельная годовая выработка (YF) достигла 1166.7 кВт·ч/кВтп. Месячный профиль генерации характеризуется выраженной сезонностью: минимальная выработка в декабре (38 кВт·ч, среднесуточная 1.22 кВт·ч/день), максимальная – в июле (199 кВт·ч, среднесуточная 6.42 кВт·ч/день).

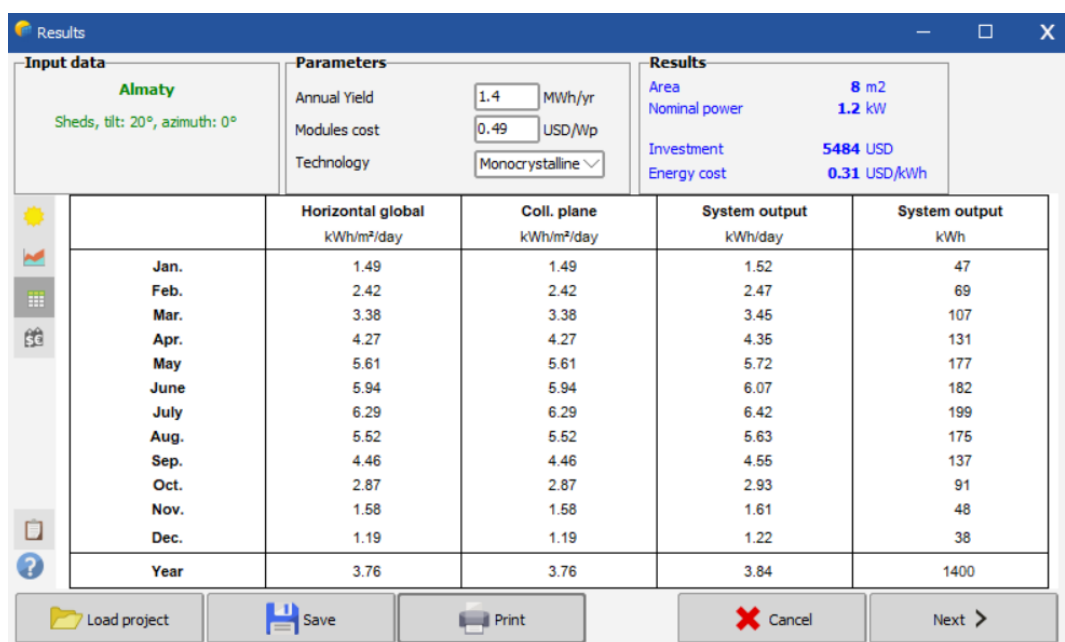


Рисунок 8: Результаты - таблица с месячными данными выработки

4.2.3. Коэффициент производительности (Performance Ratio, PR)

Расчетный коэффициент производительности (PR) системы составил 85.01%. Данный показатель отражает совокупные потери в системе (температурные, омические, инверторные, от загрязнения, несоответствия модулей, деградации и др.) относительно идеальной выработки при фактической инсоляции.

Результаты подчеркивают необходимость дальнейших исследований, включая натурные измерения, детализированное 3D-моделирование затенения, оптимизацию системных параметров и комплексное технико-экономическое обоснование для условий г. Алматы.

Заключение

В процессе выполнения этой научно-исследовательской работы я получил полезный и разносторонний опыт, охватывающий сразу несколько технических направлений. На практике я убедился, как важно правильно ориентировать солнечную панель в течение дня для повышения её эффективности. До начала проекта я знал, что угол падения солнечных лучей влияет на выработку энергии, но только при работе с системой слежения понял, насколько существенно это влияет на итоговый результат. Простая автоматизация, построенная на микроконтроллере и недорогих датчиках освещённости, действительно способна адаптировать панель к движению солнца и тем самым сделать её работу более продуктивной. Одним из самых интересных этапов стало программирование микроконтроллера.

Я научился настраивать аналого-цифровой преобразователь, считывать данные с фоторезисторов и использовать их для управления сервоприводами. Также я лучше понял, как работает широтно-импульсная модуляция (PWM), и как с её помощью можно точно задавать угол поворота сервоприводов. Параллельно с этим я освоил моделирование конструкции в Blender, что позволило визуализировать и протестировать механическую часть проекта ещё до сборки. Проект научил меня не только техническим вещам, но и дал представление о системном подходе к решению инженерных задач. Было важно не только разработать отдельные части схемы или программы, но и добиться того, чтобы они работали вместе как единое целое. Я увидел, как аппаратное, программное и механическое проектирование взаимосвязаны и как важно учитывать все аспекты при создании функционального прототипа. В результате я получил не только готовую модель солнечного трекера, но и более глубокое понимание принципов автоматизации, устойчивых технологий и практической инженерии.

Список литературы

1. Беляев, В. С., Хохлова, Л. П. *Солнечные энергоустановки*. – М.: Издательство МЭИ, 2012. – 384 с. (цитируется в тексте как [1, с. 15-20])
2. Twidell, J., Weir, T. *Renewable Energy Resources*. 3rd Edition. – Routledge, 2015. – 702 p. (цитируется в тексте как [2])
3. Петров, И.В., Сидоров, А.А. *Современные тенденции развития возобновляемой энергетики: мировой опыт и перспективы для Казахстана*. – Алматы: КазНУТУ, 2020. – 250 с.
4. Hafez, A.Z., Soliman, A., El-Metwally, K.A., Ismail, I.M. Solar tracking systems: Technologies and trackers drive types – A review // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. – 2017. – Vol. 75. – P. 1287-1309. (цитируется в тексте как [4, с. 50-55])
5. Министерство энергетики Республики Казахстан. *Концепция перехода Республики Казахстан к «зеленой экономике»*. – Астана, 2013. (Нормативный документ) (цитируется в тексте как [5, с. 112])
6. International Renewable Energy Agency (IRENA). *Renewable Energy Outlook: Global and Regional Perspectives*. – Abu Dhabi: IRENA, 2023. – (Ежегодные отчеты IRENA также могут быть полезны) (цитируется в тексте как [6])
7. Сергеев, В.Н. *Климатические аспекты использования солнечной энергии в Центральной Азии*. – Ташкент: Фан, 2019. – 210 с. (цитируется в тексте как [7])
8. Yiu, J. *The Definitive Guide to ARM® Cortex®-M3 and Cortex®-M4 Processors*. 3rd Edition. – Newnes, 2013. – 800 p. (цитируется в тексте как [8])
9. Saputra, R. A., et al. Prototype of Dual Axis Solar Tracker Using STM32 Microcontroller // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. – 2021. – Vol. 1098, no. 3. – 032049. (цитируется в тексте как [9, с. 45-50])
10. STMicroelectronics. *Datasheet: STM32F103C8T6 Medium-density performance line ARM-based 32-bit MCU*. – STMicroelectronics, 2015 (и более поздние ревизии). (цитируется в тексте как [10])
11. Tower Pro. *Datasheet: Tower Pro SG90 Micro Servo*. – Tower Pro, 2012 (и более поздние ревизии). (цитируется в тексте как [11])
12. Hubei KENTO Electronic Co., Ltd. *Datasheet: Photoresistor GL55 Series*. (Для общих характеристик LDR, дополнить статьями по их применению). (цитируется в тексте как [12])
13. MPE, M. M., & Boja, E. N. Design and Implementation of a Dual-Axis Solar Tracking System using LDR sensors // *2018 IEEE International Conference on Innovative Research and Development (ICIRD)*. – 2018. – P. 1-5.
14. PVsyst SA. *PVsyst User's Guide*. – Geneva, Switzerland. (Актуальная версия на момент использования)
15. Blender Foundation. *Blender User Manual*. (Актуальная версия на момент использования, blender.org) (цитируется в тексте как [15])

16. Гололобов, В. Н. *Микроконтроллеры STM32: Полный курс*. – СПб.: Наука и Техника, 2019. – 624 с. (цитируется в тексте как [16])
17. Кучеров, Н.Н., и др. Разработка и исследование двухосевого солнечного трекера на базе микроконтроллера // *Современные наукоемкие технологии*. – 2016. – № 5-2. – С. 283-287. (цитируется в тексте как [17])
18. Fathabadi, H. Novel high accurate sensorless dual-axis solar tracking system controlled by microcontroller // *Journal of Power and Energy Engineering*. – 2016. – Vol. 4. – P. 1-14.
19. Jamroen, C., et al. A novel LDR-based dual-axis solar tracking system with fuzzy logic control for tropical climates // *Energies*. – 2020. – Vol. 13, No. 15. – 3876.
20. Kumar, R., Singh, S.K. *Design and Development of Solar Tracking System*. – Springer, 2022. – 150 p.
21. Proteus Design Suite. Version 8.X / Labcenter Electronics Ltd. – [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.labcenter.com> (дата обращения: 05.06.2025).
22. Astrom, K.J., Murray, R.M. *Feedback Systems: An Introduction for Scientists and Engineers*. – Princeton University Press, 2010 (2nd Edition 2021).
23. Singh, G.K. Solar power generation by PV (photovoltaic) technology: A review // *Energy*. – 2013. – Vol. 53. – P. 1-13. (Обзор технологий, включая управление)
24. Королев, А.В. *Адаптивные системы управления в энергетике*. – Новосибирск: НГТУ, 2018. – 188 с.
25. Zervas, P.L., et al. Design and construction of a novel LDR-based solar tracker for optimal energy harvesting // *Applied Solar Energy*. – 2015. – Vol. 51. – P. 120–127.
26. Seme, S., Štumberger, B., Hadžiselimović, M. Solar Photovoltaic Tracking Systems for Maximizing Energy Collection-A Review // *Energies*. – 2022. – Vol. 15, Issue 22. – 8693.
27. National Renewable Energy Laboratory (NREL). *Solar Position Algorithm (SPA) Code*. (Доступен на сайте NREL, ссылка на актуальную версию и документацию).
28. Warden, P., & Situnayake, D. *TinyML: Machine Learning with TensorFlow Lite on Arduino and Ultra-Low-Power Microcontrollers*. – O'Reilly Media, 2019. – 250 p.
29. David, R., et al. TensorFlow Lite Micro: Embedded Machine Learning on TinyML Systems // *2021 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP)*. – 2021.
30. TensorFlow. *TensorFlow Lite for Microcontrollers Documentation*. (Официальная документация TensorFlow, [tensorflow.org/lite/microcontrollers](https://www.tensorflow.org/lite/microcontrollers))
31. Li, Z., et al. A review of the application of artificial intelligence in solar energy // *Energy Conversion and Management*. – 2021. – Vol. 245. – 114561.
32. STMicroelectronics. *Getting started with X-CUBE-AI on STM32 microcontrollers*. (Документация и application notes от ST).

33. Mohanty, S., et al. A computationally efficient MPPT for solar PV systems using an STM32 microcontroller // *2020 IEEE International Conference on Power Electronics, Smart Grid and Renewable Energy (PESGRE2020)*. – 2020.
34. Verganelakis, D.A., et al. Machine Learning for Solar Irradiance Forecasting: A Review // *Energies*. – 2021. – Vol. 14, No. 12. – 3423.
35. Сибикин, Ю.Д., Сибикин, М.Ю. *Технико-экономическое проектирование электроснабжения объектов*. – М.: Инфра-Инженерия, 2017. – 288 с.
36. *Правила устройства электроустановок Республики Казахстан (ПУЭ РК)*.
37. International Energy Agency (IEA). *Technology Roadmap: Solar Photovoltaic Energy*. – Paris: IEA, 2014 (и более поздние отчеты).
38. Ghulam, A. Performance analysis of different solar tracking systems in a hot arid climate // *Journal of Renewable and Sustainable Energy*. – 2013. – Vol. 5, Issue 4. – 043102.
39. Министерство национальной экономики Республики Казахстан. *Методика расчета тарифов на электрическую энергию, производимую объектами по использованию возобновляемых источников энергии*. (Актуальный нормативный документ).
40. KazPV. *Аналитические отчеты по рынку солнечной энергетики в Казахстане*.
41. Eke, R., Senturk, A. Performance comparison of a double-axis sun tracking versus fixed PV system in different seasons // *Applied Energy*. – 2012. – Vol. 97. – P. 397-403.