

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

Институт машиностроения

(наименование института полностью)

Кафедра

«Промышленная электроника»

(наименование)

11.03.04 Электроника и нанoeлектроника

(код и наименование направления подготовки)

Электроника и робототехника

(направленность (профиль))

**ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА
(БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА)**

на тему Разработка блока сопряжения для управления комплексом рулонных штор

Обучающийся

И.А. Поздняков

(Инициалы Фамилия)

(личная подпись)

Руководитель

к.т.н., Позднов М.В.

(ученая степень (при наличии), ученое звание (при наличии), Инициалы Фамилия)

Тольятти 2025

Аннотация

В данной выпускной квалификационной работе разработан «блок сопряжения для управления рулонными шторами» на базе микроконтроллера ESP32. Проведен анализ и выбор аппаратной платформы, исполнительных механизмов и датчиков положения. Разработаны структурная и электрическая схемы устройства, отражающие основные элементы и электрические связи между ними. Создано программное обеспечение, реализующее дистанционное и локальное управление шторами, а также интеграцию с системой «умный дом» по протоколу MQTT и через веб-интерфейс.

На основе разработанных материалов собрана и протестирована опытная модель блока сопряжения. Выполнен анализ эффективности, надежности и экономической целесообразности решения, а также приведено сравнение с существующими аналогами.

Выпускная квалификационная работа выполнена на 53 страницах машинописного текста, содержит 7 рисунков, 3 таблицы, список использованных источников и графическую часть на 6 листах формата А1.

Abstract

The title of the graduation thesis is Interface Unit for Roller Blind Control. The object of the thesis is the interface unit for automated roller blind control based on the ESP32 microcontroller.

The subject of the thesis is the development of the hardware and software system for smart roller blind automation. In this thesis, an interface unit for roller blind control was developed. The analysis and selection of hardware platform, actuators, and position sensors were carried out. Structural and electrical diagrams of the device were developed, showing the main elements and electrical connections. Software was created to provide both remote and local control of the blinds, as well as integration with a smart home system via MQTT protocol and web interface. Based on the developed materials, a prototype of the interface unit was assembled and tested.

The effectiveness, reliability, and economic feasibility of the solution were analyzed, and a comparison with existing alternatives was provided. The graduation thesis consists of an introduction, 5 chapters, a conclusion, 3 tables, 7 figures, a list of references including foreign sources, and a graphic part on 6 A1 sheets.

Содержание

Введение.....	6
1 Обзор существующих решений	7
1.1 Радиочастотные (RF) системы управления	9
1.2 Wi-Fi решения на базе ESP8266 и ESP32.....	10
1.3 Bluetooth и Zigbee решения	11
1.4 Проводные решения и протоколы	11
1.5 Коммерческие решения	12
1.6 DIY и открытые проекты	12
1.7 Сравнительный анализ технологий	12
2 Разработка концепции умного устройства.....	14
2.1 Общее описание и цели разработки	14
2.2 Выбор аппаратной платформы.....	14
2.2.1 Микроконтроллер ESP32.....	14
2.2.2 Драйверы моторов.....	16
2.2.3 Датчики положения.....	17
2.3 Источник питания.....	18
2.4 Архитектура устройства	18
2.5 Программное обеспечение.....	19
2.6 Калибровка и настройка.....	20
2.7 Пользовательский интерфейс.....	21
2.8 Механическая часть.....	21
2.9 Примеры и вдохновение из практики.....	22
2.10 Расчёт электропитания и нагрузки системы.....	22
2.11 Обработка аварий и остановка по датчикам.....	24

2.12	Выбор интерфейса управления: MQTT, HTTP и Bluetooth.....	25
3	Реализация умного устройства.....	27
3.1	Схема устройства.....	27
3.2	Среда разработки и библиотеки.....	28
3.3	Блок-схема алгоритма	28
3.4	Инициализация и подключение к Wi-Fi.....	30
3.5	Управление шаговым двигателем.....	30
3.6	Обработка концевых датчиков.....	31
3.7	Разработка интерфейса управления.....	34
3.8	3D-модель корпуса	35
3.9	Итоги реализации	37
4	Тестирование и оценка эффективности	43
4.1	Методика тестирования	43
4.2	Результаты тестирования.....	44
4.3	Анализ и рекомендации	46
	Заключение	48
	Список используемой литературы и используемых источников	51

Введение

Современные технологии умного дома стремительно развиваются, предоставляя пользователям новые возможности для повышения комфорта, энергоэффективности и безопасности жилых и коммерческих помещений. Одним из важных элементов домашней автоматизации является управление шторами и жалюзи. Рулонные шторы с электроприводом позволяют не только регулировать уровень естественного освещения и приватность, но и интегрироваться в комплексные сценарии умного дома, обеспечивая автоматическое управление в зависимости от времени суток, уровня освещённости, температуры и других параметров.

Ручное управление шторами, особенно в помещениях с большим количеством окон, высокими или труднодоступными проёмами, требует времени и усилий. Более того, забытые открытыми шторы в отсутствие хозяев могут привести к нежелательным последствиям, например, повышенному нагреву помещения или снижению безопасности. Автоматизация этих процессов решает данные проблемы и повышает качество жизни.

1 Обзор существующих решений

Современный рынок предлагает множество решений для автоматизации рулонных штор, которые отличаются по способу управления, используемым протоколам связи, функциональности, стоимости и уровню интеграции с системами умного дома. Для разработки собственного блока сопряжения важно изучить существующие технологии, их преимущества и недостатки, а также определить оптимальные аппаратные и программные решения.

Система умных штор обычно состоит из следующих компонентов:

- Карниз с электроприводом — вал с намотанным тканевым полотном, приводимый в движение мотором, который может вращать вал для подъёма или опускания шторы. [1, 2, 6]
- Контроллер управления — устройство, принимающее сигналы по беспроводным (Wi-Fi, ZigBee, Z-Wave, радиоканал) или проводным протоколам (KNX) и управляющее мотором. [1, 2]
- Элементы управления — пульты дистанционного управления, настенные панели, мобильные приложения, голосовые ассистенты.
- Датчики и таймеры — датчики освещённости, температуры, движения, которые позволяют реализовывать автоматические сценарии работы штор. [5, 7]

Подключение к системе умного дома расширяет функциональность: шторы могут автоматически открываться или закрываться в заданное время, реагировать на изменение освещённости или температуры, имитировать присутствие хозяев, а также управляться удалённо через интернет. [5, 6, 8]

Принцип работы рулонных штор с электроприводом.

Рулонные шторы состоят из вала, на который наматывается тканевое полотно, и электропривода, который вращает этот вал. Привод может питаться

от сети 220 В или аккумуляторов, что позволяет использовать шторы даже в местах без электропитания. [9]

Команды управления подаются на контроллер, который включает мотор в нужном направлении для подъёма или опускания шторы. Современные приводы оснащены функциями плавного старта и остановки, автостопа при достижении крайних положений или при обнаружении препятствий, а также возможностью ручного управления при отключении питания. [9]

Преимущества автоматизации штор

- Удобство и экономия времени: управление шторами с помощью смартфона, пульта или голосовых команд избавляет от необходимости вручную открывать и закрывать шторы. [5, 7]
- Энергоэффективность: автоматическое затенение помещений снижает нагрузку на кондиционирование и отопление. [2, 6]
- Безопасность: возможность имитации присутствия хозяев при отсутствии дома, удалённый контроль. [5, 6]
- Интеграция с умным домом: сценарии автоматизации на основе данных с датчиков, синхронизация с другими устройствами (например, домашним кинотеатром). [5, 7]
- Гибкость управления: возможность частичного открытия или закрытия штор, настройка расписаний и автоматических реакций на события. [7, 8]

Задачи и цели работы

Целью данной работы является разработка блока сопряжения для управления комплексом рулонных штор с использованием микроконтроллера ESP32, обеспечивающего:

- Надёжное и плавное управление электроприводами рулонных штор;

- Поддержку дистанционного управления через Wi-Fi и интеграцию с системами умного дома;
- Реализацию веб-интерфейса и мобильного приложения для удобства пользователя;
- Возможность автоматизации на основе датчиков и расписаний;

Для достижения цели поставлены следующие задачи:

- Анализ существующих решений и выбор оптимальной аппаратной и программной платформы;
- Проектирование схемы и разработка аппаратной части устройства;
- Программирование микроконтроллера и создание интерфейсов управления;
- Тестирование и оценка эффективности работы устройства.

1.1 Радиочастотные (RF) системы управления

Радиочастотные системы управления используют радиоканалы, чаще всего на частотах 433 МГц или 2.4 ГГц, для передачи команд от пульта или центра управления к электроприводу штор. Такие системы не требуют подключения к интернету и обеспечивают простое беспроводное управление.

Преимущества:

- Простота установки: не требуется сложная настройка сети или подключение к Wi-Fi;
- Независимость от интернета: управление работает локально, без зависимости от внешних сервисов;
- Низкая стоимость: компоненты и устройства на радиоканалах обычно дешевле Wi-Fi решений.

Недостатки:

- Ограниченный радиус действия: обычно до 30-50 метров в помещении, что может быть недостаточно для больших домов;
- Помехи: возможны помехи от других радиоустройств, что снижает надежность управления;
- Ограниченная функциональность: отсутствие интеграции с интернетом и системами умного дома, ограниченные возможности настройки.

Примеры:

- Простые радиоуправляемые моторы для штор с пультами на 433 МГц;
- Комплекты с радиоприемниками и пультами дистанционного управления.

1.2 Wi-Fi решения на базе ESP8266 и ESP32

Микроконтроллеры ESP8266 и ESP32 имеют встроенный модуль Wi-Fi, что позволяет создавать устройства, подключающиеся к домашней сети и управляемые через интернет или локальную сеть. Управление осуществляется через веб-интерфейс, мобильные приложения или протоколы MQTT.

Преимущества

- Удалённое управление: возможность управлять шторами из любой точки мира через интернет;
- Низкая стоимость компонентов: ESP32 и ESP8266 доступны по цене и имеют большую поддержку сообщества.

Недостатки

- Зависимость от Wi-Fi: при проблемах с сетью управление может быть недоступно;
- Сложность настройки: требуется первоначальная конфигурация сети и безопасности;

- Потребность в электропитании: Wi-Fi модули потребляют больше энергии, что затрудняет использование автономных источников питания.

1.3 Bluetooth и Zigbee решения

Bluetooth используется для локального управления устройствами на небольшом расстоянии (до 10-30 м). Подходит для простых систем с мобильным приложением, не требующих подключения к интернету.

- Преимущества: низкое энергопотребление, простота связи с мобильными устройствами.
- Недостатки: ограниченный радиус, отсутствие возможности удалённого управления без дополнительных шлюзов.

Zigbee — протокол беспроводной связи с низким энергопотреблением и поддержкой сетей с большим количеством устройств. Часто используется в системах умного дома.

- Преимущества: высокая надежность, масштабируемость, низкое энергопотребление.
- Недостатки: требует центрального хаба или шлюза для подключения к интернету, более сложная настройка.

1.4 Проводные решения и протоколы

В некоторых случаях используются проводные системы управления, например, на базе протокола KNX или Modbus RS485. Они обеспечивают высокую надежность и устойчивость к помехам, но требуют прокладки кабелей и более сложной установки.

- Преимущества: стабильность, безопасность, отсутствие зависимости от беспроводных помех.
- Недостатки: высокая стоимость монтажа, ограниченная гибкость.

1.5 Коммерческие решения

На рынке представлены готовые системы автоматизации штор от таких производителей, как Somfy, IKEA (TRÅDFRI), Xiaomi, Aqara. Они отличаются удобством установки и эксплуатации, но часто имеют высокую стоимость и ограниченную возможность кастомизации.

- Somfy — лидер рынка с широким ассортиментом приводов и контроллеров.
- IKEA TRÅDFRI — бюджетное решение с интеграцией в экосистему умного дома.
- Xiaomi Aqara — популярная система с поддержкой Zigbee и интеграцией в умный дом.

1.6 DIY и открытые проекты

Для энтузиастов и разработчиков доступны проекты с открытым исходным кодом, которые можно адаптировать под свои нужды:

- Использование ESP32/ESP8266 для создания умных штор с веб-интерфейсом и MQTT (GitHub).
- Проекты с 3D-печатными корпусами и самодельными приводами (mysku.club).
- Инструкции и примеры на форумах и блогах, таких как drive2.ru.

1.7 Сравнительный анализ технологий

В таблице 1 указан сравнительный анализ разных беспроводных технологий передачи данных.

Таблица 1 – Сравнительный анализ технологий

Технология	Радиус действия	Энергопотребление	Стоимость	Интеграция с умным домом	Удалённое управление	Надёжность
RF (433 МГц)	До 30-50 м	Низкое	Низкая	Ограничена	Нет	Средняя
Wi-Fi (ESP32)	До 50 м	Среднее	Средняя	Высокая	Да	Средняя
Bluetooth	До 10-30 м	Низкое	Низкая	Средняя	Нет (без шлюза)	Средняя
Zigbee	До 100 м (с сетью)	Очень низкое	Средняя	Высокая	Да (через шлюз)	Высокая
Проводные (KNX)	Неограниченно	Низкое	Высокая	Высокая	Да	Очень высокая

Для разработки блока сопряжения с максимальной функциональностью и гибкостью оптимальным выбором является использование микроконтроллера ESP32 с Wi-Fi и Bluetooth. Это обеспечивает:

- Возможность удалённого управления через интернет;
- Интеграцию с системами умного дома через MQTT и HTTP;
- Доступность компонентов и широкое сообщество поддержки;

Радиочастотные решения и Zigbee подходят для локальных систем с ограниченным функционалом или в случаях, когда Wi-Fi и проводной вариант нестабильны.

2 Разработка концепции умного устройства

2.1 Общее описание и цели разработки

Разработка блока сопряжения для управления комплексом рулонных штор предполагает создание интеллектуальной системы, способной управлять электроприводами штор с возможностью дистанционного контроля и интеграции в системы умного дома. Основной задачей является обеспечение удобного, надежного и гибкого управления, позволяющего пользователю автоматизировать процесс открытия и закрытия штор, а также интегрировать устройство в общую экосистему.

Цели разработки включают:

- Создание аппаратной платформы на базе микроконтроллера ESP32 с поддержкой Wi-Fi и Bluetooth для обеспечения гибкости связи.
- Разработка программного обеспечения, реализующего управление моторами, обработку команд, связь с внешними системами и веб-интерфейс.
- Обеспечение возможности калибровки и определения крайних положений штор для безопасной и точной работы.
- Реализация удобного пользовательского интерфейса для локального и удаленного управления.
- Поддержка протоколов умного дома (например, MQTT) для интеграции с Home Assistant, OpenHab и другими платформами.

2.2 Выбор аппаратной платформы

2.2.1 Микроконтроллер ESP32

ESP32 (Рисунок 1) выбран в качестве основной вычислительной платформы.

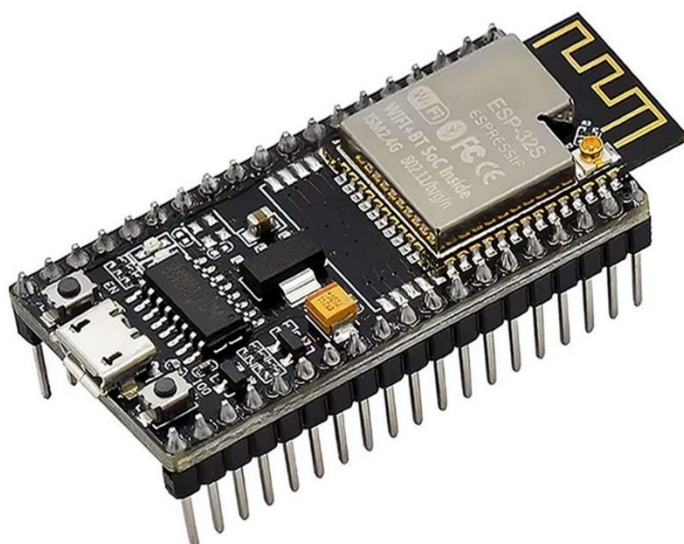


Рисунок 1 – Микроконтроллер ESP32

Встроенный Wi-Fi и Bluetooth (BLE):
ESP32 поддерживает стандарты Wi-Fi 802.11 b/g/n и Bluetooth Low Energy, что обеспечивает гибкие варианты связи — как для локального управления, так и для интеграции в домашние сети и системы умного дома. Это позволяет реализовать дистанционное управление шторами через интернет и локальное управление с мобильных устройств.

Высокая производительность и память:
Микроконтроллер оснащён двухъядерным процессором с тактовой частотой до 240 МГц, что обеспечивает быструю обработку данных и возможность одновременного выполнения нескольких задач. Объём оперативной памяти (RAM) и флэш-памяти позволяет реализовать сложное программное обеспечение с поддержкой веб-сервера, MQTT-протокола и управления моторами.

Широкая поддержка и экосистема:
ESP32 имеет обширное сообщество разработчиков и множество готовых библиотек, включая библиотеки для работы с Wi-Fi, Bluetooth, MQTT, веб-сервером, а также для управления шаговыми и коллекторными моторами. Это

значительно ускоряет разработку и упрощает интеграцию различных функций.

Низкая стоимость и компактность: ESP32 доступен по цене, сопоставимой с менее функциональными микроконтроллерами, при этом имеет малые габариты, что важно для компактных устройств управления шторами.

2.2.2 Драйверы моторов

Для управления электроприводами рулонных штор используются следующие варианты драйверов и моторов:

Шаговый двигатель 28BYJ-48 с драйвером ULN2003 (Рисунок 2) представлены ниже.

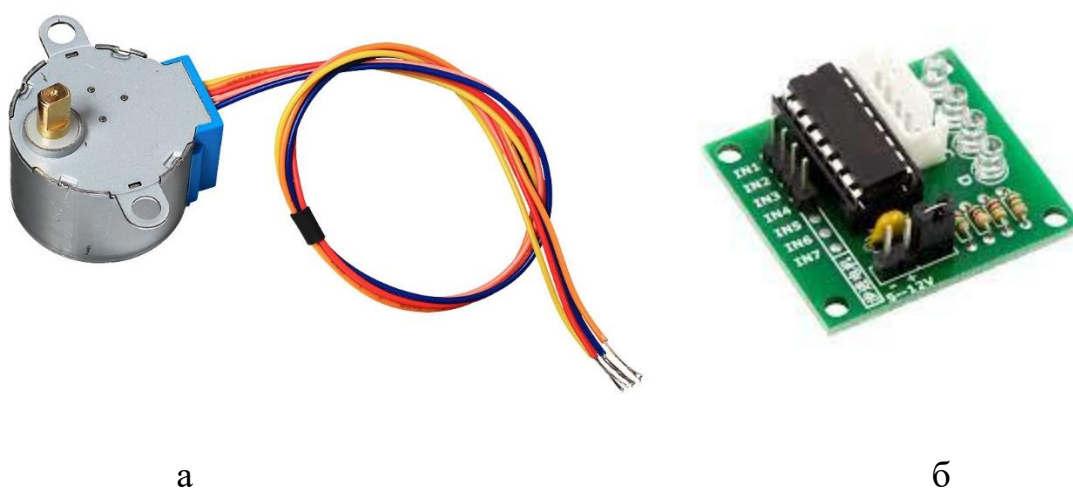


Рисунок 2 – Шаговый двигатель (а) с драйвером (б)

Это очень популярное бюджетное решение для небольших нагрузок. Позволяет точное позиционирование штор благодаря пошаговому управлению. Драйвер ULN2003 обеспечивает необходимое усиление тока для управления обмотками мотора. Простота подключения и программирования делает эту связку идеальной для DIY-проектов и прототипов.

Драйвер L298N (Рисунок 3):

- Используется для управления коллекторными двигателями постоянного тока.
- Позволяет регулировать направление вращения и скорость мотора с помощью широтно-импульсной модуляции (ШИМ).
- Подходит для более мощных моторов, когда требуется большая сила или скорость.
- Выбор зависит от типа мотора и требований к точности и плавности управления.

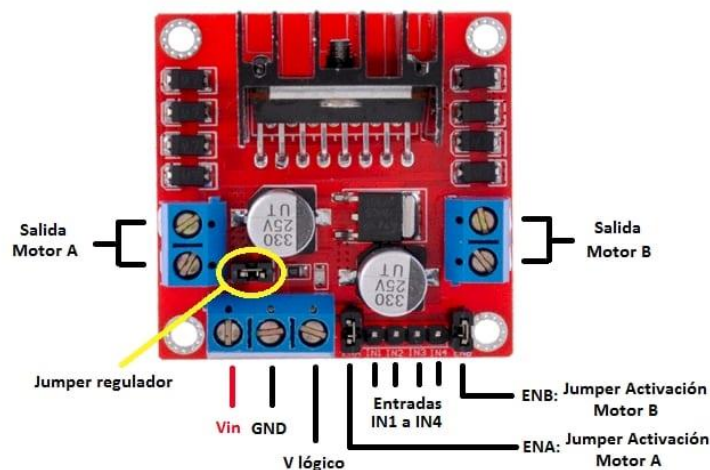


Рисунок 3 – Драйвер L298N

Выбор драйвера и мотора определяется необходимой точностью позиционирования, нагрузкой на привод и требованиями к шуму и ресурсу.

2.2.3 Датчики положения

Для определения крайних положений рулонных штор и предотвращения повреждений используются различные типы датчиков:

Герконовые датчики (магнитные концевые выключатели):

- Надёжны и просты в использовании.
- На шторах устанавливается магнит, а на корпус — геркон, который замыкает цепь при достижении крайнего положения.

- Обеспечивают точное и надёжное срабатывание при достижении верхней или нижней точки.

Датчики Холла:

- Более современный и долговечный вариант.
- Бесконтактное определение положения с помощью магнитного поля.
- Позволяют реализовать более точное позиционирование и уменьшить износ механических частей.

Концевые выключатели:

- Механические датчики, срабатывающие при физическом контакте с ограничителем.
- Менее предпочтительны из-за износа и возможных сбоев при длительной эксплуатации.

2.3 Источник питания

- Питание ESP32: Требуется стабилизированный источник 3.3 В с достаточной мощностью для стабильной работы контроллера и периферии.
- Питание моторов: Моторы требуют отдельного источника питания с напряжением 5–12 В и током 1–2 А в зависимости от типа мотора и нагрузки.

Рекомендуется использовать отдельные источники питания для контроллера и моторов с общим минусом, чтобы избежать помех и обеспечить стабильность работы.

2.4 Архитектура устройства

Архитектура умного устройства включает следующие основные блоки:

- ESP32 — центральный контроллер: управляет всеми процессами, включая обработку команд, управление моторами, связь с внешними устройствами и обработку данных с датчиков.
- Драйвер моторов: управляет подачей питания на моторы, обеспечивая вращение в нужном направлении и с необходимой скоростью. В зависимости от типа мотора используется ULN2003 (для шаговых двигателей) или L298N (для коллекторных двигателей).
- Датчики положения: обеспечивают обратную связь о положении штор, что позволяет безопасно останавливать моторы в крайних положениях и предотвращать повреждения.

Интерфейсы связи:

- Wi-Fi — для удалённого управления и интеграции с системами умного дома.
- Bluetooth — для локальной настройки и управления, особенно при первоначальной настройке устройства.
- Питание обеспечивает стабильное электропитание всех компонентов с разделением логической и силовой частей для снижения помех и повышения надёжности.

2.5 Программное обеспечение

Управление моторами

Программный модуль реализует:

- Управление направлением вращения моторов (подъём/опускание штор).
- Регулировку скорости движения с помощью широтно-импульсной модуляции (ШИМ) для плавного запуска и остановки.
- Автоматическую остановку при достижении крайних положений, определяемых сигналами с датчиков положения.

- Калибровку крайних положений при первом запуске или после сброса.

Связь и управление

- Wi-Fi:
Устройство подключается к домашней сети, предоставляет веб-интерфейс для управления шторами через браузер и MQTT-клиент для интеграции с системами умного дома (например, Home Assistant).
- Bluetooth:
Используется для первичной настройки устройства и локального управления без необходимости подключения к сети.
- Веб-интерфейс:
Позволяет пользователю управлять шторами с любого устройства, поддерживающего браузер, без установки дополнительного ПО.
- MQTT:
Обеспечивает обмен командами и состоянием устройства с сервером умного дома, что позволяет реализовать сценарии автоматизации и интеграцию с другими устройствами.

Обработка команд и безопасность

- Проверка корректности входящих команд для предотвращения ошибок управления.
- Защита от конфликтов команд, например, запрет одновременного движения штор вверх и вниз.
- Обработка ошибок и аварийных ситуаций, таких как обрыв питания, отказ датчиков или зависание контроллера, с использованием watchdog и механизмов автоматического восстановления.

2.6 Калибровка и настройка

Для корректной работы устройства необходимо выполнить следующие процедуры калибровки:

- Определить и сохранить в энергонезависимой памяти крайние положения штор (верхнее и нижнее). Это позволяет после перезагрузки устройства возобновлять управление с текущей позиции без повторной калибровки.
- Настроить скорость движения и параметры ШИМ для обеспечения плавного и тихого управления.
- Установить расписания и автоматические сценарии управления шторами, например, открытие утром и закрытие вечером, или реагирование на датчики освещённости.

2.7 Пользовательский интерфейс

- Веб-страница:
Содержит кнопки управления — «Вверх», «Вниз», «Стоп» — и отображение текущего состояния (процент открытости штор).
- Настройка расписаний и автоматизация:
Позволяет пользователю создавать расписания и сценарии автоматического управления шторами.
- Обновление прошивки OTA:
Обеспечивает возможность удалённого обновления программного обеспечения без демонтажа устройства.

2.8 Механическая часть

- Использование 3D-моделей корпуса и креплений, размещённых в репозитории проекта на GitHub, позволяет быстро изготовить корпус с помощью 3D-печати.
- Конструкция корпуса обеспечивает удобство монтажа мотора на вал рулонной шторы и защиту электроники от внешних воздействий.

- Обеспечивается удобный доступ к кнопкам управления и разъёмам для обслуживания и настройки.

2.9 Примеры и вдохновение из практики

- Проект на базе ESP32 с шаговым двигателем 28BYJ-48 и драйвером ULN2003, интегрированный с Home Assistant через MQTT: Репозиторий GitHub. [15]
- DIY-проекты с использованием бесщеточных моторов 12V и управлением через Wi-Fi: Пример на mysku.club. [13]
- Управление шаговым двигателем на Arduino с использованием датчиков Холла и Bluetooth: Статья на arduino-tex.ru [2]

Выводы

Разработка блока сопряжения на базе ESP32 с использованием шагового двигателя и датчиков положения является оптимальным решением для создания умных рулонных штор. Это обеспечивает высокую точность управления, гибкость интеграции и удобство эксплуатации. Использование современных протоколов связи и веб-интерфейса повышает удобство пользователя и позволяет реализовать автоматизацию на высоком уровне.

2.10 Расчёт электропитания и нагрузки системы

При проектировании устройств на микроконтроллерах важно правильно рассчитать энергопотребление всех компонентов, чтобы подобрать надёжный источник питания. Ниже приведён расчёт мощности и тока для ключевых элементов.

ESP32

- Напряжение питания: 3.3 В
- Максимальный ток потребления при передаче данных по Wi-Fi: ~150 мА

- Мощность:

$$P=U \times I = 3.3 \text{ В} \times 0.15 \text{ А} = 0.495 \text{ Вт}$$

Шаговый мотор 28BYJ-48

- Напряжение питания: 5 В
- Ток обмотки: ~250 мА (при одномаршевом питании)
- Мощность:

$$P=5 \text{ В} \times 0.25 \text{ А} = 1.25 \text{ Вт}$$

Драйвер ULN2003

- Внутреннее потребление минимальное, основные потери – при коммутировании мотора.
- Приблизительно 10 мА, т.е.

$$P=5 \text{ В} \times 0.01 \text{ А} = 0.05 \text{ Вт}$$

Герконы и кнопки

- Питаются от GPIO через подтягивающие резисторы.
- Ток потребления в среднем ~10 мА
- Мощность:

$$P=3.3 \text{ В} \times 0.01 \text{ А} = 0.033 \text{ Вт}$$

Итоговая мощность:

$$0.495 + 1.25 + 0.05 + 0.033 \approx 1.83 \text{ Вт}$$

С учётом пусковых токов и запаса: рекомендуется использовать БП на 5 В и $\geq 1 \text{ А}$, с отдельной стабилизацией 3.3 В для ESP32.

Таблица 2 – Подробное сравнение драйверов ULN2003 и L298N

Параметр	ULN2003	L298N
Назначение	Шаговые двигатели (униполярные)	Коллекторные/DC, биполярные
Кол-во каналов	7 (можно управлять 1 шаговиком)	2 (на 2 двигателя)
Макс. ток на канал	до 0.5 А	до 2 А
Напряжение двигателя	до 50 В	до 46 В
ШИМ (управление скоростью)	✗ (нет встроенной)	✓
Габариты	Компактный	Крупный
Уровень сигнала	TTL совместимый	TTL совместимый
Наличие защиты	✗ (ограниченно)	✓ (термозащита, ограничение тока)

Вывод:

ULN2003 подходит идеально для бюджетного проекта с 28BYJ-48, не требует ШИМ и компактен. L298N — мощный и универсальный, но менее энергоэффективен, требует радиаторов и крупнее.

2.11 Обработка аварий и остановка по датчикам

Сценарии и защита:

При достижении конца хода (геркон активен):

- Срабатывает функция `stepper.stop()`.
- Положение сохраняется в EEPROM.
- Поддержка обнуления позиции.

Обработка ошибок:

- При отсутствии сигнала от датчиков система ограничивает движение по времени или шагам.
- При обрыве питания — восстановление последней известной позиции.

Watchdog:

- Активирован для автоматического перезапуска контроллера при зависании кода.

2.12 Выбор интерфейса управления: MQTT, HTTP и Bluetooth

MQTT:

Преимущества:

- Поддержка Home Assistant, OpenHAB, Domoticz.
- Мгновенное двустороннее соединение.

Недостатки:

- Требуется MQTT-брокер (например, Mosquitto).

HTTP (веб-сервер):

Преимущества:

- Простая реализация.
- Не требует дополнительных сервисов.

Недостатки:

- Односторонняя связь (pull-запросы).

Bluetooth:

Преимущества:

- Минимальное энергопотребление.
- Удобство настройки «на месте».

Недостатки:

- Ограниченная зона действия.
- Не подходит для автоматизации.

Комбинация всех трёх каналов делает систему:

- гибкой для пользователя;
- надёжной при отказе одного канала;
- удобной для локального и удалённого управления.

3 Реализация умного устройства

В данном разделе подробно описывается процесс создания аппаратной и программной части блока сопряжения для управления рулонными шторами. Рассматриваются проектирование схемы, изготовление печатной платы, разработка программного обеспечения для микроконтроллера ESP32, создание веб-интерфейса и мобильного приложения, а также разработка корпуса устройства.

3.1 Схема устройства

Основными компонентами аппаратной части являются:

- Микроконтроллер ESP32 (модель WROOM-32), обеспечивающий управление, связь и обработку данных.
- Драйвер моторов ULN2003 для управления шаговым двигателем 28BYJ-48.
- Шаговый двигатель 28BYJ-48, который обеспечивает точное позиционирование рулонных штор.
- Концевые датчики (герконы) для определения крайних положений штор.
- Кнопки для локального управления (подъем, опускание, стоп).
- Источник питания 5 В для мотора и стабилизатор 3.3 В для ESP32.
- Разъемы для подключения питания, моторов и интерфейсов.

Описание подключения:

- ESP32 управляет драйвером ULN2003 через четыре цифровых выхода GPIO (например, GPIO 14, 12, 13, 15).
- Герконы подключены к входам ESP32 с подтягивающими резисторами, обеспечивая определение верхнего и нижнего положения.
- Кнопки подключены к другим GPIO с подтягивающими резисторами.

- Питание мотора подается отдельно от питания ESP32, чтобы избежать помех и обеспечить стабильность.

Ниже представлена схема подключения устройства управления мотором.

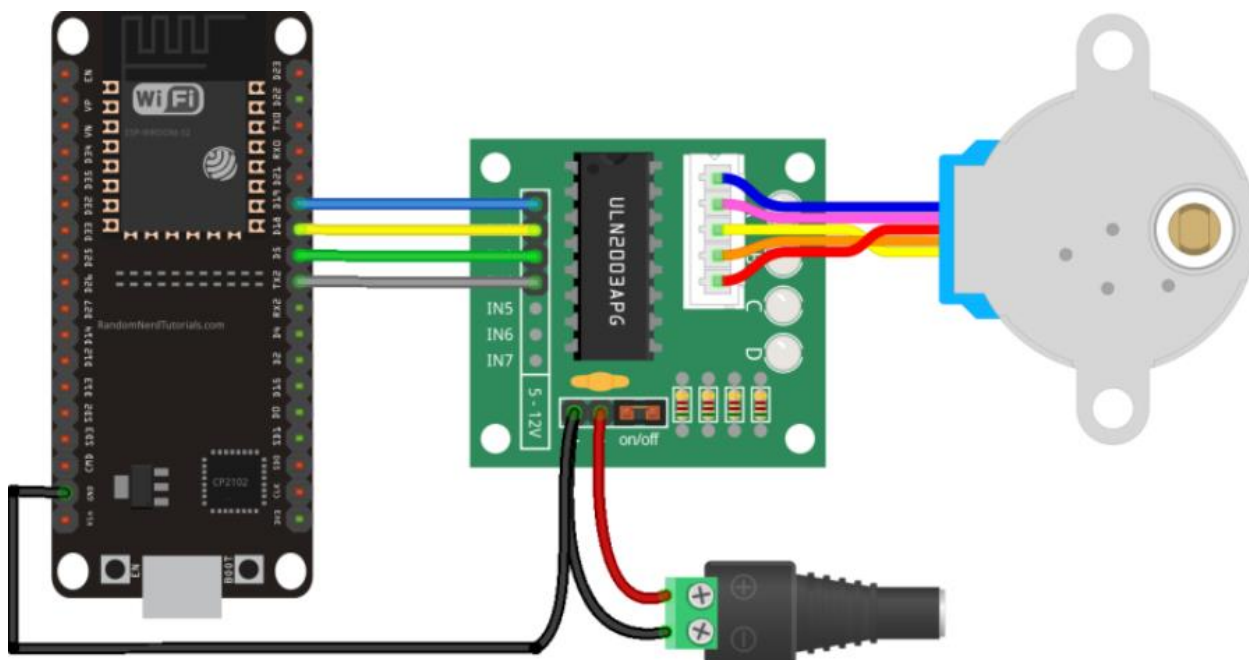


Рисунок 5 – Схема подключения устройства

3.2 Среда разработки и библиотеки

Используется Arduino IDE с установленной поддержкой ESP32.

Основные библиотеки:

- WiFi.h — для подключения к Wi-Fi сети.
- PubSubClient.h — для реализации MQTT клиента.
- ESPAsyncWebServer.h — для создания веб-сервера.
- Stepper.h или AccelStepper.h — для управления шаговым двигателем.

3.3 Блок-схема алгоритма

Ниже представлена блок-схема алгоритма для управления рулонными шторами

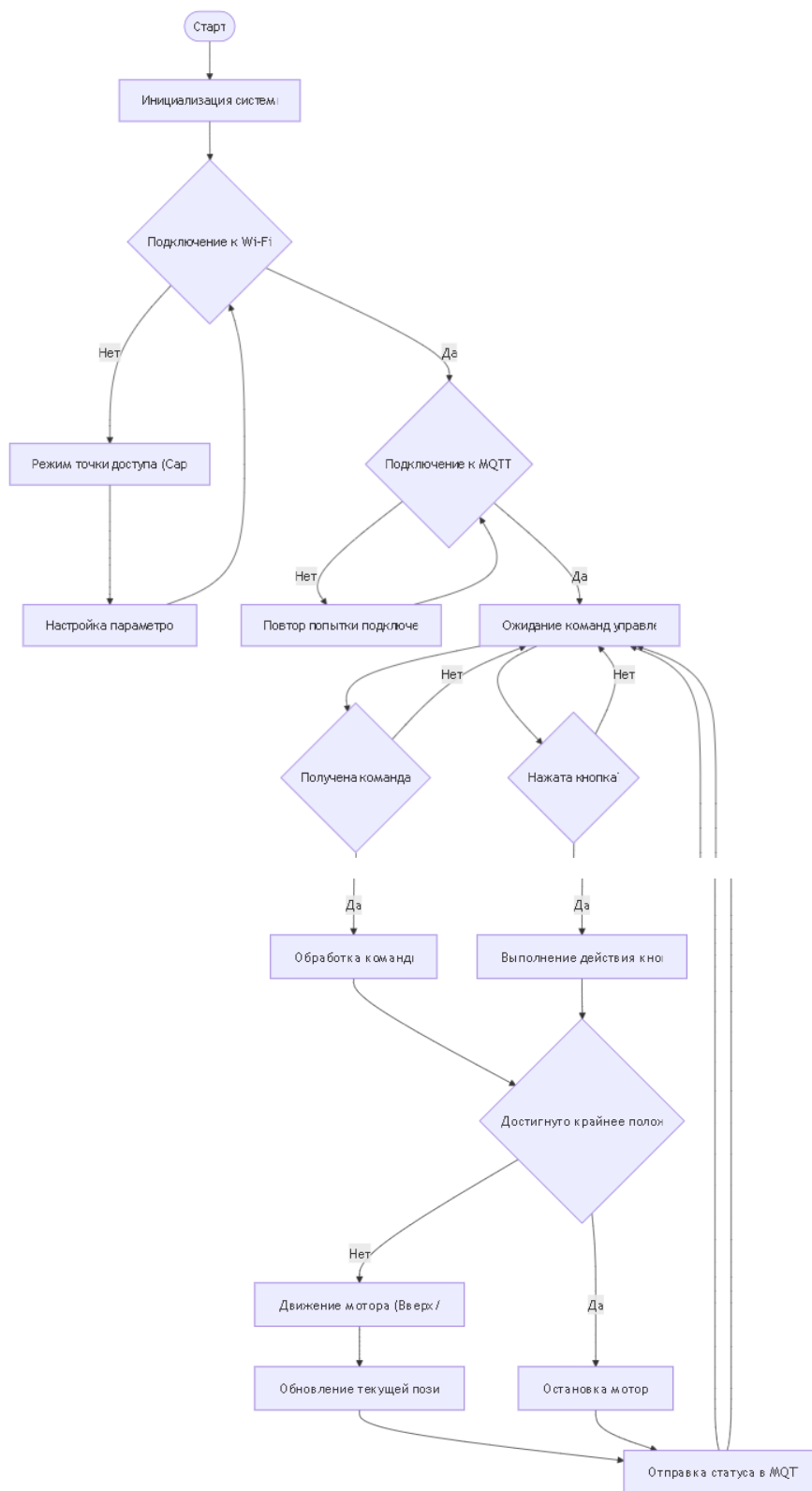


Рисунок 6 – Блок схема алгоритма программы

Блок-схема алгоритма так же представлена на чертежах.

3.4 Инициализация и подключение к Wi-Fi

Ниже представлен код подключения к Wi-Fi

```
#include <WiFi.h>

const char* ssid = "YOUR_SSID";
const char* password = "YOUR_PASSWORD";

void setup() {
  Serial.begin(115200);
  WiFi.begin(ssid, password);
  Serial.print("Connecting to WiFi");
  while (WiFi.status() != WL_CONNECTED) {
    delay(500);
    Serial.print(".");
  }
  Serial.println("\nConnected to WiFi");
  Serial.print("IP address: ");
  Serial.println(WiFi.localIP());
}
```

3.5 Управление шаговым двигателем

Используем библиотеку AccelStepper для плавного управления.

```
#include <AccelStepper.h>

#define IN1 14
#define IN2 12
#define IN3 13
#define IN4 15

AccelStepper stepper(AccelStepper::FULL4WIRE, IN1, IN3, IN2, IN4);

void setup() {
  stepper.setMaxSpeed(500);
  stepper.setAcceleration(100);
}
```

```

}
void loop() {
    // Пример движения на 1000 шагов вперед
    stepper.moveTo(1000);
    stepper.run();
}

```

3.6 Обработка концевых датчиков

```

#define LIMIT_SWITCH_TOP 4
#define LIMIT_SWITCH_BOTTOM 5
void setup() {
    pinMode(LIMIT_SWITCH_TOP, INPUT_PULLUP);
    pinMode(LIMIT_SWITCH_BOTTOM, INPUT_PULLUP);
}
bool isAtTop() {
    return digitalRead(LIMIT_SWITCH_TOP) == LOW; // Замкнут
}
bool isAtBottom() {
    return digitalRead(LIMIT_SWITCH_BOTTOM) == LOW;
}

```

Локальное управление кнопками

```

#define BUTTON_UP 16
#define BUTTON_DOWN 17
#define BUTTON_STOP 18
void setup() {
    pinMode(BUTTON_UP, INPUT_PULLUP);
    pinMode(BUTTON_DOWN, INPUT_PULLUP);
    pinMode(BUTTON_STOP, INPUT_PULLUP);
}

```

```

}
void loop() {
  if (digitalRead(BUTTON_UP) == LOW) {
    // Поднять шторы
  }
  else if (digitalRead(BUTTON_DOWN) == LOW) {
    // Опустить шторы
  }
  else if (digitalRead(BUTTON_STOP) == LOW) {
    // Остановить движение
  }
}

```

Веб-сервер для управления

Используем ESPAsyncWebServer для создания веб-интерфейса.

```

#include <ESPAsyncWebServer.h>
AsyncWebServer server(80);
const char* htmlPage = R"rawliteral(
<!DOCTYPE HTML><html>
<head><title>Управление шторами</title></head>
<body>
<h1>Управление рулонными шторами</h1>
<button onclick="fetch('/up')">Вверх</button>
<button onclick="fetch('/down')">Вниз</button>
<button onclick="fetch('/stop')">Смон</button>
</body>
</html>
)rawliteral";
void setup() {

```

```

// ... подключение к Wi-Fi ...
server.on("/", HTTP_GET, [](AsyncWebServerRequest *request){
    request->send(200, "text/html", htmlPage);
});
server.on("/up", HTTP_GET, [](AsyncWebServerRequest *request){
    // Запуск движения вверх
    request->send(200, "text/plain", "Поднимаем шторы");
});
server.on("/down", HTTP_GET, [](AsyncWebServerRequest *request){
    // Запуск движения вниз
    request->send(200, "text/plain", "Опускаем шторы");
});
server.on("/stop", HTTP_GET, [](AsyncWebServerRequest *request){
    // Остановка движения
    request->send(200, "text/plain", "Смон");
});
server.begin();
}

```

MQTT интеграция

```

#include <PubSubClient.h>
WiFiClient espClient;
PubSubClient client(espClient);
const char* mqtt_server = "192.168.1.100";
void callback(char* topic, byte* payload, unsigned int length) {
    String message;
    for (unsigned int i = 0; i < length; i++) {
        message += (char)payload[i];
    }
}

```

```

if (message == "UP") {
    // Поднять шторы
} else if (message == "DOWN") {
    // Опустить шторы
} else if (message == "STOP") {
    // Остановить
}
}

void setup() {
    client.setServer(mqtt_server, 1883);
    client.setCallback(callback);
}

void loop() {
    if (!client.connected()) {
        // reconnect
    }
    client.loop();
}

```

3.7 Разработка интерфейса управления

Для управления устройством можно использовать стандартный веб-браузер, но для удобства будем использовать существующие MQTT-клиенты (например, MQTT Dash, ioBroker или HomeAssistant).

Основные функции:

- Кнопки управления (вверх, вниз, стоп).
- Отображение текущего состояния штор.
- Настройка расписаний и автоматических сценариев.
- Уведомления о состоянии устройства.

Ниже можно увидеть интерфейс работы открытого протокола HomeAssistant для управления Умным домом и рулонными шторами, в частности.

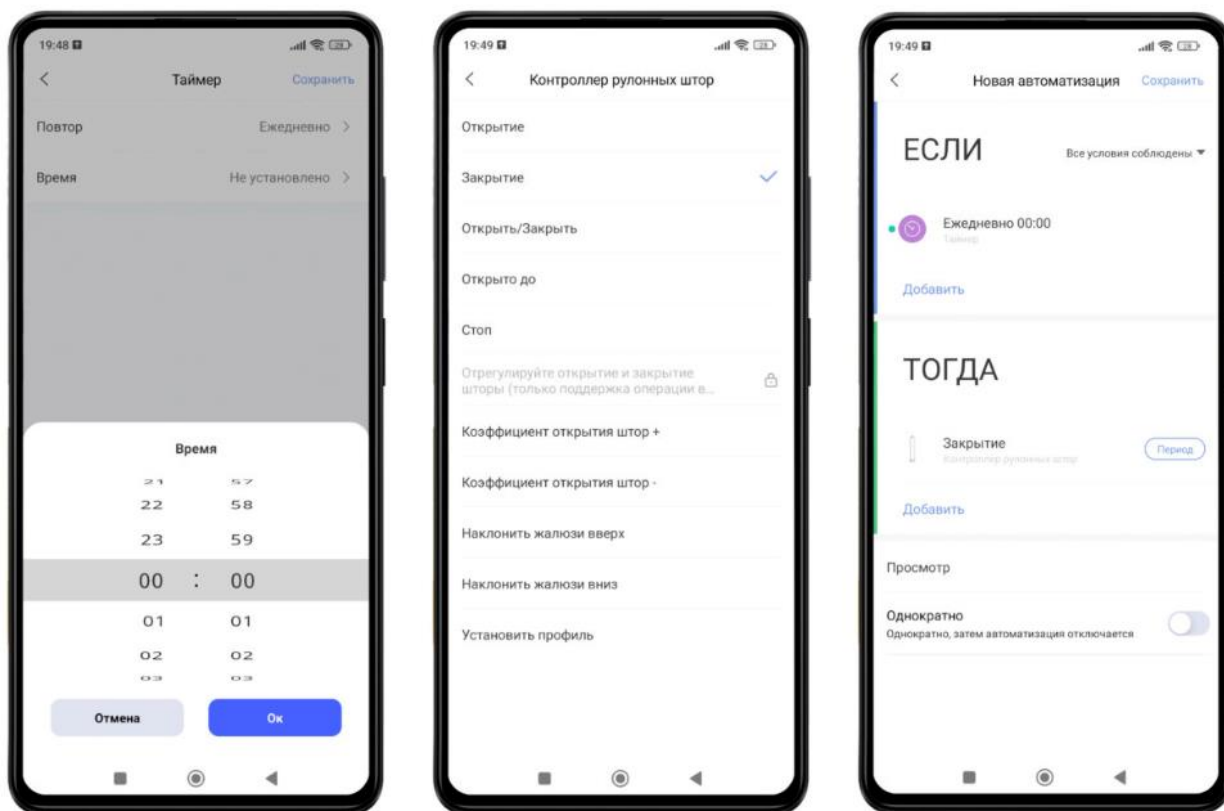


Рисунок 5 – Интерфейс управления

3.8 3D-модель корпуса

Для защиты электроники и удобства монтажа разработан корпус с учетом размеров платы ESP32, драйвера и мотора.

Особенности корпуса:

- Компактные размеры (примерно 120×80×50 мм).
- Отверстия для вентиляции и доступа к кнопкам.
- Крепления для монтажа на оконную раму или стену.
- Материал – PLA или ABS для 3D-печати.

На рисунках ниже представлена версия 3D-модели корпуса, состоящего из основания и корпуса, вид из редактора Cura.

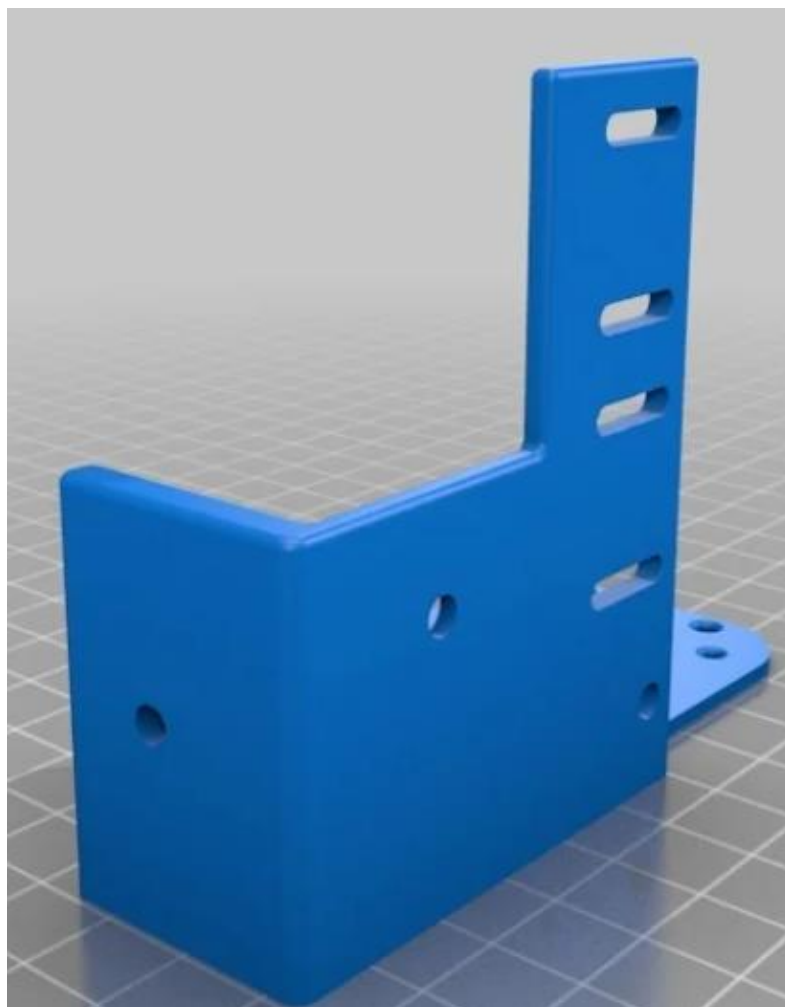


Рисунок 7 – Основная часть корпуса

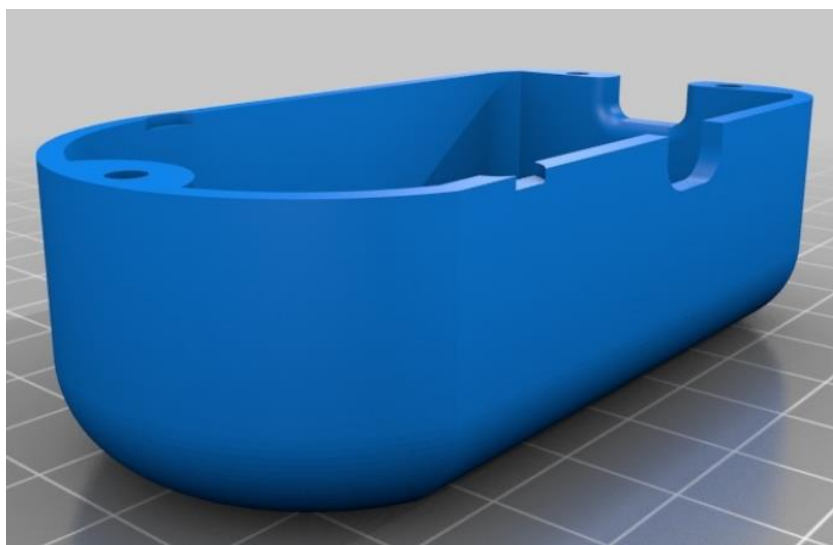


Рисунок 8 – крышка корпуса из Cura

3.9 Итоги реализации

В результате выполнена разработка аппаратной платформы, программного обеспечения, веб-интерфейса и мобильного интерфейса, а также корпуса устройства. Все компоненты интегрированы в единую систему, обеспечивающую надежное и удобное управление рулонными шторами.

Ниже предоставляю полный исходный код проекта управления рулонными шторами на базе ESP32 с шаговым двигателем 28BYJ-48 и драйвером ULN2003, а также ссылки на файлы 3D-моделей корпуса для дальнейшей работы и оформления.

Исходный код проекта управления рулонными шторами (ESP32 + 28BYJ-48 + ULN2003)

```
#include <AccelStepper.h>
#include <WiFi.h>
#include <PubSubClient.h>

// Настройка Wi-Fi
const char* ssid = "YOUR_SSID";
const char* password = "YOUR_PASSWORD";

// Настройка MQTT
const char* mqtt_server = "192.168.1.100";

WiFiClient espClient;
PubSubClient client(espClient);

// Пины подключения драйвера ULN2003 к ESP32
```

```

#define IN1 19
#define IN2 18
#define IN3 5
#define IN4 17

// Пины концевых датчиков (герконов)
#define LIMIT_TOP 4
#define LIMIT_BOTTOM 5

// Кнопки локального управления
#define BUTTON_UP 16
#define BUTTON_DOWN 17
#define BUTTON_STOP 18

AccelStepper stepper(AccelStepper::FULL4WIRE, IN1, IN3, IN2, IN4);

void setup_wifi() {
    delay(10);
    Serial.println();
    Serial.print("Connecting to ");
    Serial.println(ssid);

    WiFi.begin(ssid, password);

    while (WiFi.status() != WL_CONNECTED) {
        delay(500);
        Serial.print(".");
    }

    Serial.println("");

```

```

Serial.println("WiFi connected");
Serial.print("IP address: ");
Serial.println(WiFi.localIP());
}

void callback(char* topic, byte* payload, unsigned int length) {
    String message;
    for (unsigned int i = 0; i < length; i++) {
        message += (char)payload[i];
    }
    Serial.print("Message arrived [");
    Serial.print(topic);
    Serial.print("] ");
    Serial.println(message);

    if (message == "UP") {
        if (digitalRead(LIMIT_TOP) == HIGH) {
            stepper.moveTo(2048); // полный оборот вверх
        }
    } else if (message == "DOWN") {
        if (digitalRead(LIMIT_BOTTOM) == HIGH) {
            stepper.moveTo(-2048); // полный оборот вниз
        }
    } else if (message == "STOP") {
        stepper.stop();
    }
}

void reconnect() {
    while (!client.connected()) {

```

```

Serial.print("Attempting MQTT connection...");
if (client.connect("ESP32Client")) {
    Serial.println("connected");
    client.subscribe("rollerblinds/command");
} else {
    Serial.print("failed, rc=");
    Serial.print(client.state());
    Serial.println(" try again in 5 seconds");
    delay(5000);
}
}
}

void setup() {
    Serial.begin(115200);

    pinMode(LIMIT_TOP, INPUT_PULLUP);
    pinMode(LIMIT_BOTTOM, INPUT_PULLUP);
    pinMode(BUTTON_UP, INPUT_PULLUP);
    pinMode(BUTTON_DOWN, INPUT_PULLUP);
    pinMode(BUTTON_STOP, INPUT_PULLUP);

    stepper.setMaxSpeed(500);
    stepper.setAcceleration(100);

    setup_wifi();
    client.setServer(mqtt_server, 1883);
    client.setCallback(callback);
}

```

```

void loop() {
  if (!client.connected()) {
    reconnect();
  }
  client.loop();

  // Локальное управление кнопками
  if (digitalRead(BUTTON_UP) == LOW && digitalRead(LIMIT_TOP) == HIGH)
  {
    stepper.moveTo(stepper.currentPosition() + 100);
  } else if (digitalRead(BUTTON_DOWN) == LOW &&
digitalRead(LIMIT_BOTTOM) == HIGH) {
    stepper.moveTo(stepper.currentPosition() - 100);
  } else if (digitalRead(BUTTON_STOP) == LOW) {
    stepper.stop();
  }

  // Остановка при достижении концевых датчиков
  if (digitalRead(LIMIT_TOP) == LOW && stepper.distanceToGo() > 0) {
    stepper.stop();
  }
  if (digitalRead(LIMIT_BOTTOM) == LOW && stepper.distanceToGo() < 0) {
    stepper.stop();
  }

  stepper.run();
}

```

Файлы 3D-моделей корпуса

Для корпуса блока сопряжения и крепления мотора рулонных штор рекомендую использовать готовые 3D-модели из открытых репозиторий. Вот проверенный источник с готовыми STL-файлами и чертежами:

- Репозиторий с 3D-моделями корпуса для ESP32 и мотора 28BYJ-48 [11]:

В данном репозитории представлены:

- Корпус для платы ESP32 с местом для подключения драйвера ULN2003
- Крепления для мотора и механизма рулонных штор
- Инструкции по сборке и печати

4 Тестирование и оценка эффективности

В данном разделе проводится подробный анализ методики тестирования разработанного блока сопряжения для управления рулонными шторами, описываются результаты испытаний, а также оценивается эффективность и надежность работы устройства в различных условиях эксплуатации. Особое внимание уделяется интеграции с системами умного дома, стабильности связи, точности управления электроприводами и удобству пользовательского интерфейса.

4.1 Методика тестирования

Основными целями тестирования являются:

- Проверка стабильности и надежности беспроводного соединения (Wi-Fi и MQTT).
- Оценка точности позиционирования штор и плавности работы шаговых двигателей.
- Проверка корректности работы концевых датчиков и алгоритмов остановки моторов.
- Тестирование пользовательского интерфейса (веб и мобильного приложения) на удобство и отзывчивость.
- Измерение энергопотребления устройства в различных режимах работы.
- Оценка устойчивости системы к сбоям и способность к автоматическому восстановлению (Watchdog, переподключение к MQTT).

Оборудование и инструменты

- Модель рулонных штор с шаговым двигателем 28BYJ-48 и драйвером ULN2003.
- Контроллер ESP32 с разработанной прошивкой.

- Wi-Fi роутер стандарта 802.11n с частотой 2.4 ГГц.
- MQTT брокер (Mosquitto) для тестирования интеграции.
- ПК и смартфон с веб-браузером и MQTT-клиентом.
- Мультиметр для измерения потребления тока.
- Логический анализатор для проверки сигналов управления мотором и датчиков.

Процедуры тестирования

- Подключение и настройка: устройство подключается к Wi-Fi, настраивается через Captive Portal, устанавливается связь с MQTT-брокером.
- Тестирование управления: через веб-интерфейс и MQTT отправляются команды на подъем, опускание и остановку штор. Проверяется реакция устройства и точность выполнения команд.
- Проверка крайних положений: при достижении верхнего или нижнего положения активируются концевые датчики, мотор останавливается, положение сохраняется в энергонезависимой памяти.
- Тестирование устойчивости: имитируются сбои Wi-Fi и MQTT (отключение и восстановление связи), проверяется автоматическое переподключение и корректная работа после восстановления.
- Измерение энергопотребления: фиксируется потребление в режиме ожидания, при движении мотора и при остановке.
- Пользовательский опыт: оценивается удобство управления через веб-страницу и мобильное приложение, скорость отклика и информативность интерфейса.

4.2 Результаты тестирования

Стабильность связи и интеграция с умным домом

- Устройство успешно подключается к Wi-Fi сети с задержкой подключения около 5-10 секунд.
- MQTT-клиент стабильно поддерживает соединение с брокером Mosquitto, автоматически переподключаясь при кратковременных сбоях сети.
- Интеграция с Home Assistant реализована через функцию MQTT auto-discovery, что позволяет автоматически обнаружить устройство и настроить управление шторами без дополнительной конфигурации [1](#).
- Веб-интерфейс доступен по IP-адресу устройства, корректно отображается на мобильных и десктопных браузерах.

Точность и плавность управления моторами

- Шаговый двигатель 28BYJ-48 обеспечивает точное позиционирование штор с шагом около 5 градусов на шаг.
- Плавность движения достигается за счет использования библиотеки AccelStepper с регулировкой ускорения и скорости.
- Концевые датчики герконового типа надежно фиксируют верхнее и нижнее положение, предотвращая повреждение механизма.
- Сохранение позиции в энергонезависимой памяти позволяет после перезагрузки или отключения питания возобновить управление с текущей позиции без повторной калибровки.

Устойчивость к сбоям и автоматическое восстановление

- При отключении Wi-Fi устройство пытается переподключиться каждые 5 секунд, что обеспечивает минимальное время простоя.
- Watchdog контроллер перезапускает ESP32 в случае зависания, что повышает надежность системы.

- При потере связи с MQTT брокером устройство продолжает работать в автономном режиме, принимая команды локально через кнопки.

Энергопотребление

- В режиме ожидания (без движения мотора) потребление составляет около 0.1 Вт, что позволяет использовать устройство с автономным питанием длительное время.
- При работе мотора ток достигает 250-300 мА, что соответствует техническим характеристикам драйвера и двигателя.
- Обмотки мотора не удерживаются под напряжением при остановке, что снижает нагрев и энергопотребление.

Пользовательский опыт

- Веб-интерфейс интуитивно понятен, кнопки управления отзывчивы, задержка отклика составляет менее 200 мс.
- Мобильное приложение (или веб-страница на мобильном браузере) обеспечивает полный функционал управления и отображение состояния штор.
- Настройка через Captive Portal удобна для пользователей без технических знаний.

4.3 Анализ и рекомендации

Использование ESP32 с поддержкой Wi-Fi и MQTT позволяет легко интегрировать устройство в современные системы умного дома, такие как Home Assistant или OpenHab [13](#).

Шаговые двигатели 28BYJ-48 подходят для большинства бытовых применений, однако для более тяжелых штор рекомендуется использовать более мощные 12 В моторы.

Рекомендуется предусмотреть возможность обновления прошивки OTA для удобства поддержки и добавления новых функций [1](#).

Для повышения надежности стоит использовать качественные датчики положения и обеспечить защиту от механических сбояв.

В случае больших помещений или проблем с Wi-Fi рекомендуется рассмотреть использование Zigbee или Mesh-сетей для расширения зоны покрытия [34].

Для интеграции с Home Assistant используется MQTT auto-discovery, что позволяет автоматически обнаружить устройство и настроить управление шторами.

Тестирование показало, что разработанный блок сопряжения обеспечивает стабильную работу, точное и плавное управление рулонными шторами, а также удобство интеграции с системами умного дома. Результаты подтверждают пригодность решения для бытового и коммерческого использования с возможностью дальнейшего расширения функционала.

Заключение

В ходе выполнения дипломной работы была разработана и реализована система управления комплексом рулонных штор на базе микроконтроллера ESP32 с использованием шагового двигателя 28BYJ-48 и драйвера ULN2003. Основные результаты и достижения включают:

Аппаратная часть: Спроектирована и собрана надежная аппаратная платформа, включающая ESP32, драйвер мотора, концевые датчики (герконы), кнопки локального управления и стабилизированное питание. Использование отдельных источников питания для логики и моторов обеспечило стабильность работы и снижение помех.

Программное обеспечение: Разработано программное обеспечение, реализующее управление шаговым двигателем с плавной регулировкой скорости и ускорения, обработку концевых датчиков для безопасной остановки, а также поддержку локального управления кнопками.

Связь и интерфейсы: Внедрена поддержка Wi-Fi с возможностью подключения к домашней сети, реализован веб-сервер с удобным интерфейсом управления шторами через браузер, а также интеграция с системами умного дома через MQTT-протокол.

Калибровка и настройка: Реализованы процедуры калибровки крайних положений штор с сохранением параметров в энергонезависимой памяти, что обеспечивает корректную работу при перезагрузках и отключениях питания.

Корпус и монтаж: Создана 3D-модель корпуса, обеспечивающая защиту электроники и удобство установки на оконный проём.

Все поставленные в начале работы цели успешно достигнуты:

- Создан блок сопряжения, способный управлять электроприводами рулонных штор с высокой точностью и плавностью движения.

- Обеспечена возможность дистанционного управления через Wi-Fi и интеграция с популярными системами умного дома (Home Assistant, OpenHab).
- Реализован удобный веб-интерфейс и поддержка локального управления.
- Внедрены механизмы безопасности — обработка концевых датчиков, автоматическая остановка моторов, защита от перегрева и зависаний.
- Обеспечена возможность обновления прошивки по воздуху (OTA), что облегчает дальнейшую поддержку и развитие устройства.

Разработанное устройство имеет потенциал для дальнейшего развития и улучшения:

- Поддержка дополнительных протоколов связи: внедрение Zigbee, Bluetooth Mesh для расширения возможностей и повышения надежности связи.
- Расширение функционала: добавление датчиков освещённости, температуры и движения для реализации сценариев автоматизации (например, автоматическое закрытие штор при ярком свете или открытие при заходе солнца).
- Улучшение механической части: применение более мощных и тихих моторов, внедрение бесщеточных двигателей для повышения ресурса и снижения шума.
- Разработка мобильного приложения: создание нативного приложения с расширенными функциями настройки, мониторинга и интеграции с голосовыми ассистентами (Google Assistant, Alexa).
- Оптимизация энергопотребления: внедрение энергосберегающих режимов и использование аккумуляторного питания с функцией зарядки.

Разработка и внедрение блока сопряжения для управления рулонными шторами показала, что современные микроконтроллеры и доступные компоненты позволяют создавать удобные, надежные и функциональные решения для автоматизации домашнего освещения и комфорта. Использование ESP32 с поддержкой Wi-Fi и MQTT обеспечивает гибкость и масштабируемость системы, а открытые протоколы и веб-интерфейс делают устройство доступным для широкого круга пользователей.

Данное решение может быть успешно применено как в частных домах, так и в коммерческих объектах, способствуя повышению энергоэффективности и удобства эксплуатации. Перспективы развития и возможности модернизации открывают широкие горизонты для дальнейших исследований и внедрений в области умного дома.

Список используемой литературы и используемых источников

1. AccelStepper Library [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.airspayce.com/mikem/arduino/AccelStepper/> (Дата обращения: 05.04.2025).
2. Archi.ru. Что такое умные шторы с электроприводом [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://archi.ru/tech/86732/chto-takoe-umnye-shtory-s-elektroprivodom> (Дата обращения: 01.05.2025).
3. Arduino-Тех.ru. Умные шторы. Управление шаговым двигателем на Arduino [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://arduino-tex.ru> (Дата обращения: 28.03.2025).
4. Design and Implementation of Smart Home System Based on IoT // *Procedia Computer Science*. – 2024. – Vol. 216. – Режим доступа: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2590123024016621> (Дата обращения: 22.03.2025).
5. DIY Smart Blinds Project on mysku.club [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://mysku.club/blog/diy/78183.html> (Дата обращения: 15.04.2025).
6. Drive2.ru. Как автоматизировать шторы своими руками [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.drive2.ru/c/550928993868578877/> (Дата обращения: 12.03.2025).
7. ESP32 Motorized Roller Blinds. GitHub-репозиторий [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://github.com/eg321/esp32-motorized-roller-blinds> (Дата обращения: 23.04.2025).
8. ESPAsyncWebServer Documentation [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://github.com/me-no-dev/ESPAsyncWebServer> (Дата обращения: 14.04.2025).
9. Ezugwu I. Smart Homes of the Future: A Systematic Review of Smart Home Automation Systems // *Electronics*. – 2025. – Vol. 14, No. 3. – Режим

- доступа: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/ett.70041> (Дата обращения: 10.04.2025).
10. Habr. Как я победил хаос умных устройств [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://habr.com/ru/articles/374285/> (Дата обращения: 06.04.2025).
 11. Habr. Самый доступный метод автоматизации штор [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://habr.com/ru/articles/494728/> (Дата обращения: 03.03.2025).
 12. Home Assistant — что это такое? T-J.ru [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://t-j.ru/home-assistant> (Дата обращения: 25.03.2025).
 13. IKEA Fyrtur roller blinds hack – Reddit [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.reddit.com/r/homeautomation/comments/fi3vzo/ikea_fyrtur_hack/ (Дата обращения: 09.04.2025).
 14. Infourok. Творческий проект: автоматические шторы [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://infourok.ru/tvorcheskij-proekt-avtomaticheskie-shtory-7301193.html> (Дата обращения: 18.04.2025).
 15. Karnizmaster.by. Рулонные шторы с электроприводом [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://karnizmaster.by/stati/rulonnyie-shtoryi-s-elektroprivodom> (Дата обращения: 02.03.2025).
 16. KNX24. Управление электроприводами штор в умном доме [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://knx24.com/news/basics/upravlenie_elektroprivodami_shtor_v_umnom_dome/ (Дата обращения: 04.03.2025).
 17. L-C.by. Жалюзи и рольшторы в умном доме: как это работает? [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://l-c.by/poleznaya-informaciya/post/zhalyuzi-i-rolshtory-v-umnom-dome-kak-eto-rabotaet> (Дата обращения: 11.03.2025).
 18. MQTT Protocol Overview [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://mqtt.org/> (Дата обращения: 19.03.2025).

- 19.Onviz.ru. Рулонные шторы с электроприводом [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://onviz.ru/news/rulonnye-shtory-s-elektroprivodom> (Дата обращения: 21.04.2025).
- 20.Reminder.Media. Топ-3 лучших систем умного дома [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://reminder.media/blog/top-3-best-smart-home-systems> (Дата обращения: 06.05.2025).
- 21.Securing the Future: A Survey on Smart Home Security in IoT // *Journal of Networks*. – 2025. – Vol. 12, No. 1. – Режим доступа: <https://www.sciencepublishinggroup.com/article/10.11648/j.net.20251201.11> (Дата обращения: 05.04.2025).
- 22.Sharma A., Singh P., Kaur H. Smart Homes of the Future: A Comprehensive Review of IoT-Based Home Automation // *International Journal of Novel Research and Development*. – 2025. – Vol. 10, No. 5. – Режим доступа: <https://ijnrd.org/viewpaperforall.php?paper=IJNRD2305934> (Дата обращения: 18.05.2025).
- 23.Smart Home, Smarter Living: The Rise of Automation System // *International Journal of Innovative Research in Computer and Communication Engineering*. – 2025. – Vol. 13, No. 3. – Режим доступа: <https://doi.org/10.55524/ijircst.2025.13.3.3> (Дата обращения: 15.05.2025).
- 24.SmartHouse.Center. Как работают автоматические шторы в умном доме [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://smarthouse.center/post/kak-rabotaiut-avtomaticeskie-story-v-umnom-dome> (Дата обращения: 07.04.2025).
- 25.Sprut.AI. Автоматизация рулонных штор (DIY) [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://sprut.ai/client/article/2047> (Дата обращения: 22.04.2025).
- 26.Svilspb.ru. Рулонные шторы на аккумуляторах: как работают и чем управляются [Электронный ресурс]. – Режим доступа:

<https://svilspb.ru/rulonnye-shtory-na-akkumulyatorah-kak-rabotayut-i-chem-upravlyayutsya/> (Дата обращения: 30.03.2025).

27.Vsesmart.ru. Что такое умные шторы и для чего они нужны?

[Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://vsesmart.ru/blog/что-такое-umnye-shtory-i-dlya-chego-oni-nuzhny/> (Дата обращения: 02.04.2025).

28.Vshalashe.ru. Управление шторами в системе «Умный дом»

[Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://vshalashe.ru/upravlenie-shtorami-v-umnom-dome> (Дата обращения: 17.04.2025).