

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/специальности)

Электроника и робототехника

(направленность (профиль)/специализация)

**ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА
(БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА)**

на тему Разработка дополнительной оси движения для промышленного манипулятора

Обучающийся

С. А. Федоров

(Инициалы Фамилия)

(личная подпись)

Руководитель

к.т.н., доцент, А. В. Прядилов

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

Консультант

И.Ю. Усатова

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

Аннотация

Объем работы: 56 страниц, 29 рисунков, 2 таблицы, 23 источников литературы и 3 приложения.

Объектом исследования является дополнительная линейная ось движения для промышленного манипулятора, предназначенная для расширения его рабочей зоны и повышения технологической гибкости.

Целью работы стало проектирование и создание модульной системы дополнительной оси перемещения с использованием доступных комплектующих и современной элементной базы, обеспечивающей точное позиционирование и управление через Ethernet-интерфейс.

В рамках выполнения работы были решены следующие задачи:

- проведен анализ существующих решений и выбор оптимальной конструктивной схемы;
- подобраны комплектующие: шаговый двигатель NEMA 23, драйвер TB6600, шарико-винтовая передача Ø8 мм, направляющие MGN12 и микроконтроллер STM32F103C8T6 [14];
- разработана 3D-модель и спроектирован корпус устройства;
- выполнена сборка механической части;
- разработан электронный блок управления;
- создана печатная плата с интерфейсами связи и питания;
- написано программное обеспечение для микроконтроллера, реализующее команды движения вперед, назад, остановку и парковку с учетом сигнала от концевого выключателя.

Степень внедрения: разработан и собран прототип дополнительной оси движения, интегрированный в автоматизированную транспортную платформу, созданную на кафедре «Промышленная электроника» Тольяттинского государственного университета.

Abstract

The title of the bachelor's thesis: "Development of an additional motion axis for an industrial manipulator".

The volume is 56 pages, 29 figures, 2 tables, 23 sources, 3 appendices.

The object of the study is a gripper device controlled by a digital signal.

The aim of the work is to develop a prototype of a gripping device for an automatic transport platform using an embedded electronic control unit.

Work tasks:

- analysis of initial data and existing solutions;
- selection of necessary components;
- development and design of the housing of the gripping device;
- manufacturing and assembly of the housing;
- development of an electronic control unit;
- development of a schematic diagram;
- writing a program for a microcontroller.

Degree of implementation: the necessary components were selected, the housing of the device was designed and manufactured, an electronic control unit was developed and a program for the microcontroller was written.

This work presents the development of a gripping device for an automatic transport platform. A review of the state of the issue, selection of components, design and manufacture of the housing, development of an electronic control unit and a program for the microcontroller are carried out. The manufactured gripping device is installed in a prototype of an automated transport platform developed at the Department of Industrial Electronics of Togliatti State University.

Содержание

Введение.....	5
1. Состояние вопроса	6
1.1. Формулирование цели и задач проекта	6
1.2. Анализ исходных данных и существующих решений.....	7
1.3. Определение концепции.....	9
2. Подбор комплектующих	12
2.1. Проектирование конструкции устройства	34
2.2. Разработка системы управления	37
3. Разработка печатных плат	43
Заключение.....	49
Список используемой литературы.....	50
Приложение А. Структурная схема	52
Приложение Б. Принципиальная электрическая схема.....	53
Приложение В. Перечень элементов	54

Введение

Современные промышленные предприятия активно внедряют роботизированные системы для автоматизации производственных процессов. Одним из ключевых элементов таких систем являются роботы-манипуляторы, способные выполнять сложные операции с высокой точностью и скоростью. Однако в условиях динамично развивающихся технологий возникает все большая потребность в повышении гибкости и мобильности манипуляторов при внедрении на производственный участок, что требует усовершенствования их конструкции и функциональности.

Промышленные роботы манипуляторы получили широкое распространение в сфере автоматизации производственных процессов за счет гибкости, вариативности технических решений, универсальности. Так, например, объединяют в автоматизированную ячейку металлообрабатывающий центр с числовым программным управлением и промышленный робот манипулятор, для бесперебойной загрузки оборудования, повышения качества, снижения себестоимости готового изделия.

Однако встречаются ситуации, когда производительность обрабатывающего центра низкая, установка робота на одну рабочую зону экономически нецелесообразна, нерентабельна. Если же таких станков несколько, то автоматизированную ячейку можно составить из нескольких обрабатывающих комплексов с роботом манипулятором на дополнительной подвижной оси, чтобы оптимизировать расходы на автоматизированные процессы.

Особую актуальность приобретает разработка дополнительных степеней свободы для роботизированных манипуляторов, в частности, создание дополнительной оси движения. Это позволяет расширить рабочую зону манипулятора, повысить его маневренность и адаптивность к различным производственным задачам.

1 Состояние вопроса

1.1 Формулирование цели и задач проекта

Актуальность данной работы обусловлена необходимостью повышения гибкости и производительности промышленных робототехнических систем. На современном этапе автоматизации производства широкое распространение получили промышленные манипуляторы, способные выполнять типовые технологические операции, такие как перемещение, штабелирование, сортировка. Однако в ряде случаев возникает задача обслуживания нескольких рабочих зон или оборудования, расположенного на расстоянии, что невозможно без расширения области применения манипулятора.

Решением данной проблемы является использование дополнительной линейной оси, по которой перемещается рука робота. Такая система позволяет использовать один манипулятор на нескольких станциях, сократить количество используемых роботов, повысить рентабельность оборудования и упростить структуру автоматизированного участка.

Дополнительная ось представляет собой модуль продольного перемещения, управляемый электронным блоком на базе микроконтроллера. Перемещение осуществляется с помощью шагового двигателя с драйвером TB6600, управление осуществляется цифровыми командами через Ethernet-модуль USB—TCP232-T2 [12STM] [8].

Целью работы является разработка дополнительной оси движения, предназначенной для установки на существующую платформу с промышленным манипулятором. Система должна быть модульной, простой в изготовлении, совместимой с современными микроконтроллерами и доступной элементной базой.

Для достижения цели поставлены следующие задачи:

- проанализировать существующие решения;

- определить конструктивные и функциональные требования к модулю;
- выполнить подбор комплектующих [4, 5, 9];
- разработать 3D-модель устройства;
- спроектировать электрическую принципиальную схему [16, 20, 22];
- разработать печатную плату;
- реализовать управляющее программное обеспечение на базе STM32F103C8T6 [10].

1.2 Анализ исходных данных и существующих решений

На современном рынке промышленных решений существует большое количество готовых модулей линейного перемещения, предназначенных для расширения рабочей зоны промышленных манипуляторов. Наиболее известные примеры включают линейный блок KUKA KL, системы на базе линейных приводов от компании Güdel, а также решения, реализованные в линейных модулях роботов ABB.

Линейный блок KUKA KL, показанный на рисунке 1, представляет собой промышленную платформу с высокой грузоподъемностью и жесткостью. Он предназначен для перемещения робота вдоль оси X и применяется в крупных сборочных линиях, где требуется обслуживание нескольких рабочих зон. Блок выполнен на массивных рельсовых направляющих и может достигать длины до 10 метров.



Рисунок 1 – Линейный блок KUKA KL

Компания Güdel предлагает универсальные линейные модули с сервоприводами, которые используются совместно с манипуляторами FANUC, Yaskawa и другими. Основное преимущество модулей Güdel — модульность, высокая точность позиционирования и интеграция с промышленными контроллерами. Привод, показанный на рисунке 2, осуществляется по зубчатой рейке или шарико-винтовой передаче в зависимости от требований по точности и нагрузке.



Рисунок 2 – Линейный привод Güdel

ABB также применяет системы линейного перемещения для расширения диапазона действия своих манипуляторов. Такие оси встраиваются в общую систему управления роботом и позволяют перемещать манипулятор вдоль производственной линии. Устройства обладают высокой степенью автоматизации и интеграции, но требуют значительных затрат на внедрение.

Описанные системы являются дорогостоящими и сложными в реализации. В учебных, исследовательских и малосерийных производственных проектах подобные модули могут быть заменены на более простые и доступные аналоги с использованием шаговых двигателей, рельсов MGN12 и шарико-винтовых передач [1, 2, 21].

На основе анализа был сделан вывод о целесообразности создания собственного линейного модуля на базе доступных комплектующих, с управлением от микроконтроллера STM32 и возможностью интеграции в существующие робототехнические системы [20].

1.3 Определение концепции

На основе анализа существующих промышленных решений и существующих технических ограничений была сформулирована концепция устройства — дополнительного модуля линейной оси, предназначенного для продольного перемещения манипулятора по рабочей зоне.

Устройство должно выполнять следующие функции:

- обеспечение точного возвратно-поступательного перемещения по одной оси;
- прием и обработка команд управления;
- перемещение вперед/назад с возможностью парковки в нулевом положении;
- остановка по команде или при срабатывании концевого выключателя.

Для реализации поставленных задач была разработана механическая схема на базе:

- рельсовых направляющих MGN12 длиной до 1 метра [23];
- шарико-винтовой передачи (ШВП) с ходовым винтом диаметром 8 мм;
- шагового двигателя NEMA 23 в качестве исполнительного механизма.

Крутящий момент на винт передается через муфту. Подвижная платформа жестко соединена с гайкой ШВП. По оси имеется один концевой выключатель и упоры, ограничивающие перемещение. Движение обеспечивает драйвер ТВ6600, подключенный к микроконтроллеру STM32F103C8T6, который управляет подачей импульсов (STEP) и направлением (DIR).

Связь с внешними системами реализована через модуль USB-TCP232-T2, преобразующий сигналы STM32 UART в Ethernet. Это позволяет управлять системой удаленно — с ПЛК, SCADA или с терминала ПК.

Программное обеспечение обеспечивает прием команд: «вперед», «назад», «стоп», «парковка». В алгоритм включена защита от закливания и ошибочного ввода. Все компоненты размещены на компактной плате управления, рассчитанной на односторонний монтаж.

Таким образом, сформирована концепция линейной системы перемещения на базе доступной элементной базы с программным управлением и возможностью дальнейшей модернизации под конкретные задачи. Основные преимущества концепции:

- низкая стоимость;
- простота реализации;
- гибкость управления;
- совместимость с существующими платформами и манипуляторами.

Выводы по разделу 1

В результате анализа текущего состояния вопроса и существующих промышленных решений установлено, что линейные модули перемещения широко применяются в составе робототехнических комплексов ведущих производителей — KUKA, Güdel, ABB. Такие системы обеспечивают высокую точность и надёжность, но требуют значительных финансовых и технических ресурсов для внедрения.

Для целей учебного и экспериментального применения использование дорогостоящих промышленных модулей нецелесообразно. Было принято решение о разработке собственной конструкции дополнительной оси движения, построенной на базе доступных и распространённых компонентов, применяемых в малой автоматизации и DIY-системах.

В ходе определения концепции были выделены следующие ключевые решения:

- применение направляющих MGN12 и ШВП Ø8 мм в качестве кинематической базы;
- использование шагового двигателя NEMA 23 в связке с драйвером TB6600;
- управление на базе STM32F103C8T6 с приёмом команд по Ethernet (USR-TCP232-T2);
- компактная печатная плата управления с возможностью модернизации.

2 Подбор комплектующих

Рельсовые направляющие, показанные на рисунке 3, представляют собой механизм, состоящий из каретки и рельсы. Рельса является направляющей для движущейся каретки, обладает высокой жесткостью. Каретка передвигается по направляющей за счет тел качения, обычно такими являются металлические шарики, которые циркулируют по корпусу. К преимуществам можно отнести точность позиционирования, долгий срок службы, большой выбор кареток и рельс под различные задачи. К недостаткам можно отнести стоимость и сложность в приобретении направляющих для перемещения от 1,5 метров.



Рисунок 3 – Рельсовые направляющие

Цилиндрическая направляющая на опоре, показанная на рисунке 4, представляет собой механизм, состоящий из цилиндрической направляющей на опоре и линейных подшипников. За счет конструкции направляющая получается более точной в перемещении, относительно направляющих на цилиндрических направляющих, так как опора сопротивляется деформации. Линейные подшипники не являются точными в перемещении, присутствуют радиальные люфты. Данный тип направляющих удобно использовать в

конструкции, где на одной оси используются несколько кареток и рельс, чтобы снизить общую неточность и люфты.



Рисунок 4 – Цилиндрическая направляющая на опоре

Цилиндрические направляющие, показанные на рисунке 5, являются бюджетным вариантом направляющей, использующей в каретках линейные подшипники. Минусы конструкции заключаются в отсутствии жесткости за счет деформации цилиндрических направляющих, что ведет к низкой точности.



Рисунок 5 – Цилиндрическая направляющая

Для удешевления и упрощения конструкций используют направляющие, состоящие из роликов и профилей, показанное на рисунке 6. Данное решение широко применяется в 3Д-принтерах, бюджетных лазерных и фрезерных станках. К недостаткам можно отнести износ полимерных роликов, низкую точность. Однако решение обладает низкой стоимостью, универсальностью, ход каретки зависит от длины профиля.



Рисунок 6 – Каретка с роликами и конструкционный профиль

Для преобразования вращательного движения шагового двигателя в поступательное в конструкции дополнительной оси применена шарико-винтовая передача (ШВП), показанная на рисунке 7. Данный тип передачи обладает высокой точностью, жесткостью и КПД, что делает его оптимальным решением для систем линейного перемещения в автоматизированных установках.

В рамках проекта был выбран ШВП диаметром 8 мм и шагом резьбы 2 мм [16]. Основными преимуществами данной конструкции являются:

- компактные габариты;
- высокая точность позиционирования (до 0,01 мм в режиме микрошага);
- возможность работы на высоких скоростях без самопроизвольного смещения;
- минимальный люфт за счет предварительного натяжения шариковой гайки.

В конструкцию трансмиссии входят:

- ходовой винт с трапецеидальной резьбой для циркуляции шариков;
- шариковая гайка с возвратом потока шариков;
- прецизионные подшипники в корпусах на концах оси (опционально — типы FK08/FF08);
- упругая муфта для соединения с валом шагового двигателя.

Передача крутящего момента от двигателя осуществляется через муфту на конец винта, закрепленный в опоре с радиально-упорным подшипником. Ходовая платформа жестко прикреплена к каретке гайки, обеспечивая прямолинейное перемещение по направляющим MGN12.

Пример параметров используемой шарико-винтовой передачи:

- диаметр вала: 8 мм
- шаг резьбы: 2 мм

- длина винта: 600 мм
- тип гайки: SFU1204 (упрощенный вариант)
- материал: сталь C45 или аналогичная углеродистая сталь

Использование шарико-винтовых передач обеспечивает плавный ход, минимальный люфт и достаточную для поставленной задачи жесткость. Также передача не требует сложного обслуживания, что делает ее пригодной для мелкосерийных и образовательных решений [9].



Рисунок 7 – Шарико-винтовая передача

В системах линейной автоматизации наряду с винтовыми передачами широкое распространение получили конструкции, основанные на использовании зубчатого ремня, показанный на рисунке 8. Такие модули применяются в устройствах, где требуется высокая скорость перемещения при умеренных требованиях к точности. Наибольшее распространение такие системы получили в 3D-принтерах, лазерных гравировальных установках, а также в малогабаритных транспортных роботах.

Конструктивно модуль на ремне представляет собой алюминиевый профиль, по которому перемещается каретка, соединенная с ремнем GT2 или T5. Движение осуществляется за счет вращения приводного шкива,

соединенного с валом шагового двигателя. С противоположной стороны установлен холостой шкив с механизмом натяжения.

К преимуществам линейных модулей с ременным приводом можно отнести:

- сравнительно высокую скорость линейного перемещения (до 300 мм/с и выше);
- простоту изготовления и сборки
- низкую стоимость комплектующих;
- бесшумность работы.

Однако следует учитывать ряд ограничений:

- низкую точность позиционирования (обычно в пределах $\pm 0,1$ – $0,3$ мм);
- проскальзывание и растяжение ремня;
- необходимость регулярной калибровки и натяжения;
- снижение жесткости конструкции при увеличении длины хода.

Применение ременного модуля целесообразно в случаях, когда на первом месте стоит скорость перемещения и отсутствие инерционной нагрузки, а требования к точности остаются второстепенными.

В рамках данной работы данный тип привода рассматривался на этапе проектирования, но не был выбран в качестве основного решения. Причиной неудачи стали повышенные требования к точности и повторяемости позиционирования, обусловленные особенностями использования модуля в составе системы с промышленным манипулятором. Было принято решение использовать шарико-винтовую передачу, как более надежную и стабильную по механическим характеристикам.

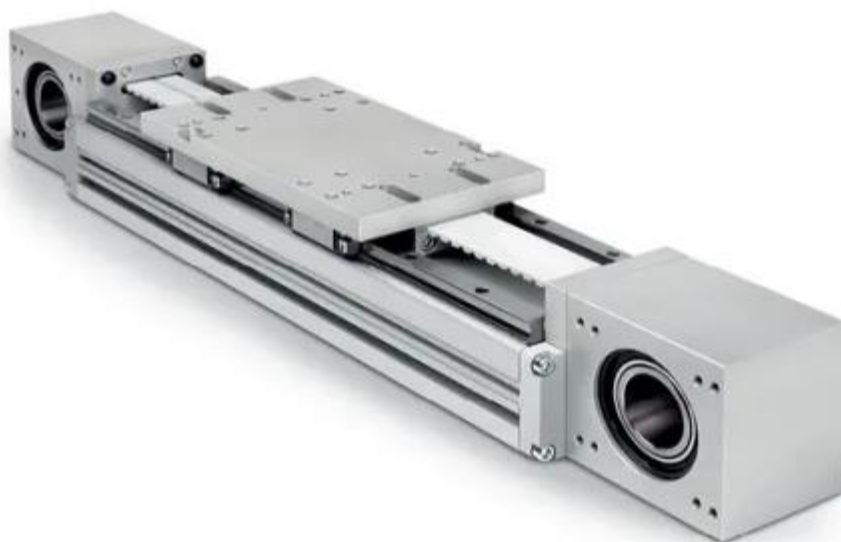


Рисунок 8 – Модуль линейного перемещения с зубчатым ремнем

Одним из способов реализации поступательного движения в системах линейной автоматизации является использование реечной передачи. Данный тип привода отличается высокой надежностью, устойчивостью к динамическим нагрузкам и способностью передавать усилия на большие длины хода. Он нашел широкое применение в станках с числовым программным управлением, порталных установках, а также в тяжелых робототехнических системах.

Конструктивно зубчатый привод состоит из:

- линейной зубчатой рейки, закрепленной вдоль базовой плоскости модуля;
- ведущей шестерни, установленной на валу электродвигателя;
- опорной каретки, соединенной с силовой частью конструкции.

При вращении шестерни каретка совершает поступательное движение по рельсу. Привод может быть выполнен на основе серводвигателя или шагового двигателя через редуктор или напрямую в зависимости от требований к точности и усилию.

К основным преимуществам зубчатого привода можно отнести:

- отсутствие ограничений по длине перемещения (возможность наращивания планок по секциям);
- высокую скорость перемещения и возможность реализации больших ускорений;
- сравнительно высокая точность позиционирования при использовании прецизионных шестерен и редукторов;
- хорошая жесткость механической цепи.

Среди недостатков:

- наличие зазора (люфта) между зубьями, требующего компенсации или механического предварительного натяжения;
- необходимость регулярной смазки и обслуживания;
- повышенный уровень шума по сравнению с винтовыми или ременными передачами;
- более высокая стоимость комплектующих промышленного класса.

Использование реечной передачи, показанная на рисунке 9, целесообразно в системах, где важны скоростные, динамические и прочностные характеристики. Однако в условиях ограниченного бюджета и требования высокой точности при малых нагрузках такой привод уступает шарико-винтовой передаче, которая имеет минимальный люфт и лучшую повторяемость на малых скоростях.

В рамках данного проекта в качестве альтернативного решения рассматривался зубчатый привод, но был отклонен из-за сложности реализации в настольном исполнении, невозможности компактного монтажа, а также избыточности по параметрам для задач привода дополнительной оси манипулятора.



Рисунок 9 – Зубчатые рейки

Для обеспечения надёжной фиксации и стабильной работы шарико-винтовой пары в конструкции линейного модуля применяются специальные опоры, предназначенные для удержания и центрирования ходового винта. От правильного выбора и установки опор зависит точность перемещения, отсутствие осевых люфтов и срок службы механизма в целом.

В проекте использованы две опоры:

- фланцевая опора с радиально-упорными подшипниками (тип FK08) — установлена со стороны привода (двигателя) и выполняет функцию жёсткой неподвижной опоры;
- свободная опора (тип FF08) — размещена на противоположной стороне и обеспечивает компенсацию температурных и механических деформаций.

Жёсткая опора (FK08) содержит прецизионную сборку из двух радиально-упорных подшипников, установленных с предварительным натягом. Такая конструкция обеспечивает фиксацию винта по двум направлениям: осевому и радиальному, исключая возможность его смещения

в процессе работы. С этой стороны к валу ШВП крепится гибкая муфта, соединяющая винт с валом шагового двигателя.

Свободная опора (FF08) содержит один радиальный подшипник и предназначена для поддержания свободного торца винта, предотвращая его изгиб при вращении. Опора не препятствует осевому смещению, что позволяет компенсировать тепловое удлинение винта при длительной работе.

Опоры монтируются к корпусу устройства через крепёжные отверстия и фиксируются стопорными винтами. Установка производится с использованием центровки, чтобы исключить биение винта при вращении, особенно на высоких скоростях. Ось вращения ШВП должна совпадать с направлением линейного перемещения каретки для обеспечения минимального сопротивления и равномерного износа шариковой гайки.

Применение стандартных опорных узлов (FK08 и FF08) упрощает сборку, повышает надёжность привода и обеспечивает повторяемую геометрию установки при серийном производстве, показаны на рисунках 10 и 11 соответственно.



Рисунок 10 – Опоры под ШВП



Рисунок 11 – Кронштейн двигателя НМ12-57

Шаговые двигатели показаны на рисунке 12. Конструктивно шаговые электродвигатели состоят из статора, на котором расположены обмотки возбуждения, и ротора, выполненного из магнитомягкого или из магнитотвёрдого материала. Шаговые двигатели с магнитным ротором позволяют получать больший крутящий момент и обеспечивают фиксацию ротора при обесточенных обмотках.

В машиностроении наибольшее распространение получили высокомоментные двухфазные гибридные шаговые электродвигатели с угловым перемещением $1,8^\circ/\text{шаг}$. (200 шагов на оборот) или $0,9^\circ/\text{шаг}$. (400 шагов на оборот). Точность выставления шага определяется качеством механической обработки ротора и статора электродвигателя.

Производители современных шаговых электродвигателей гарантируют точность выставления шага без нагрузки до 5 % от величины шага. Дискретность шага создаёт существенные вибрации, которые в ряде случаев могут приводить к снижению крутящего момента и возбуждению механических резонансов в системе. Уровень вибраций удаётся снижать при использовании режима дробления шага или при увеличении количества фаз. Режим дробления шага (микрошаг) реализуется при независимом управлении током обмоток шагового электродвигателя. Управляя соотношением токов в

обмотках, можно зафиксировать ротор в промежуточном положении между шагами [11].



Рисунок 12 – Шаговый двигатель

Драйвер шагового двигателя ТВ6600, показан на рисунке 13, на базе микросхемы Toshiba ТВ6600HQ предназначен для управления шаговыми двигателями с фланцем 57 мм и менее. Настраиваемый ток фазы до 3.5 А позволяет получить максимальный момент от шаговых двигателей. Алгоритмы управления и цепи защиты увеличили надежность драйвера. Имеются защиты от короткого замыкания, превышения напряжения питания, перегрева. Установлен радиатор для дополнительного охлаждения микросхемы. Сигнальные входы оптоизолированы.



Рисунок 13 – Драйвер шагового двигателя TB6600

STM32F103C8T6 — это один из самых популярных представителей семейства STM32 от STMicroelectronics, основанный на 32-битном ядре ARM Cortex-M3, которое обеспечивает отличное соотношение производительности и энергопотребления. Этот микроконтроллер обладает тактовой частотой до 72 МГц, что позволяет ему уверенно справляться с задачами встраиваемого управления, цифровой обработки сигналов, простых графических интерфейсов и коммуникационных протоколов в реальном времени [17]. На рисунке 14 показаны контакты подключения данного микроконтроллера. Сам микроконтроллер показан на рисунке 15.

STM32F103C8T6 имеет 64 КБ флэш-памяти и 20 КБ оперативной памяти SRAM, чего достаточно для сенсорных систем, протокольных преобразователей, промышленных контроллеров и управления шаговыми двигателями. Поддержка таких интерфейсов, как SPI, I2C, USART, USB и CAN, делает его универсальным для интеграции в разнородные системы. Также он предлагает развитую систему таймеров, поддержку внешних прерываний и встроенный АЦП на 12 бит, что критично для многих задач сбора аналоговой информации.

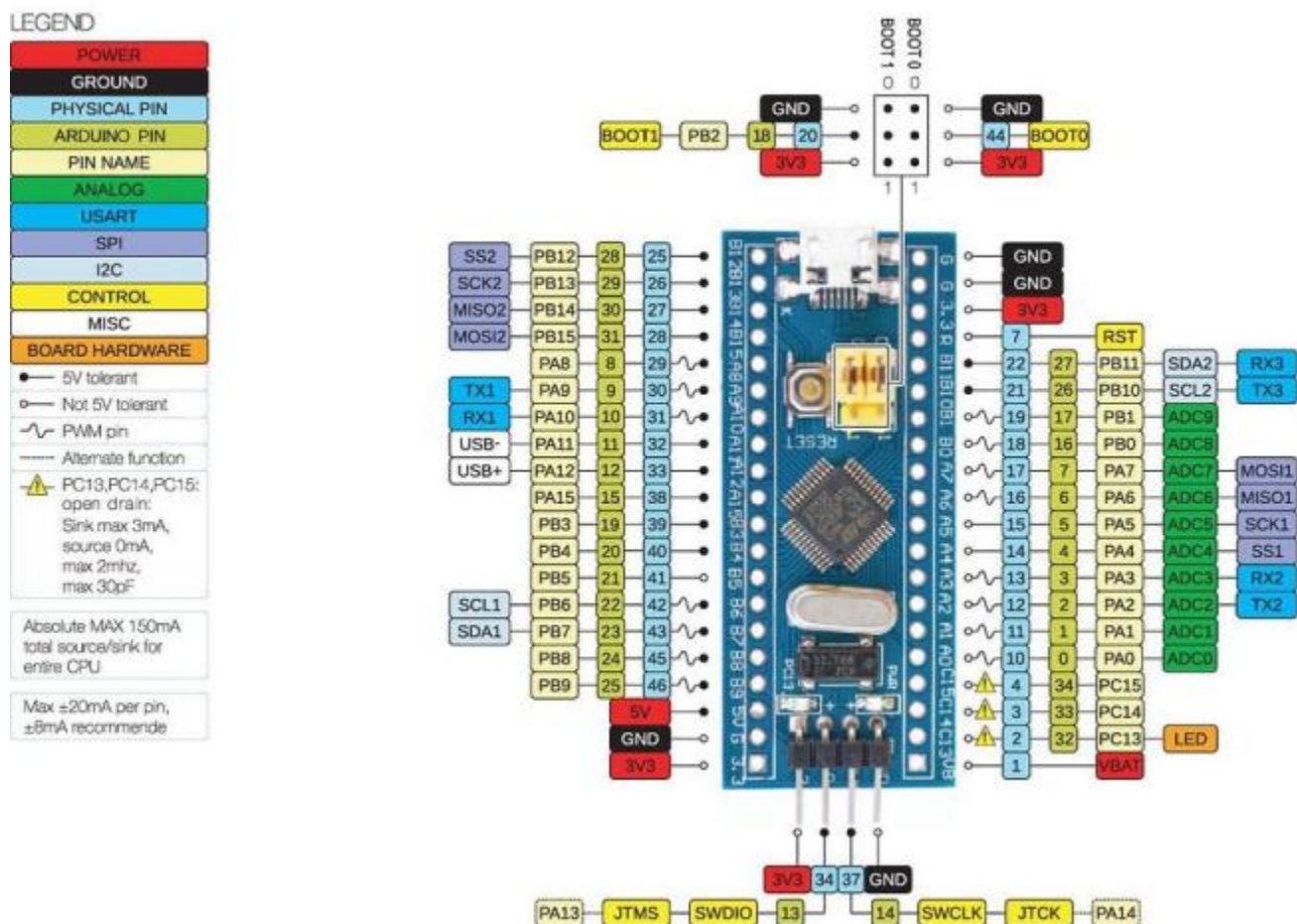


Рисунок 14 – Контакты подключения STM32F103C8T6

По сравнению с аналогами из других семейств, например, Atmel/Microchip AVR ATmega328P или NXP LPC серия Cortex-M0/M3, STM32F103C8T6 выделяется большей тактовой частотой, улучшенной архитектурой ядра с расширенной системой прерываний NVIC, более продвинутым набором периферии и лучшей масштабируемостью в рамках всей STM32-линейки. В отличие от AVR, где архитектура ограничена 8-битами и меньшей производительностью, STM32 предлагает настоящий 32-битный подход с богатой экосистемой — от отладочных средств ST-Link, OpenOCD до библиотек HAL, LL, CMSIS.

Таким образом, STM32F103C8T6 — это сбалансированное решение по цене, производительности и возможностям, которое подходит для большинства проектов, где важна гибкость, высокая скорость и развитые

интерфейсы, но не требуются специфические меры защиты или повышенная надежность.

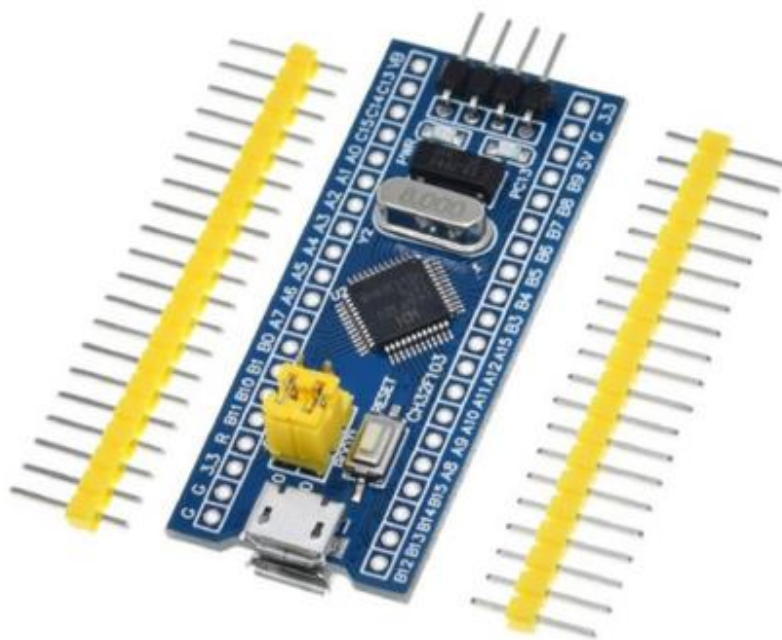


Рисунок 15 – Микроконтроллер STM32F103C8T6

Стабилизатор напряжения LM2596, показанный на рисунке 16 — это импульсный понижающий (step-down, buck) регулятор напряжения, работающий на основе ШИМ (широтно-импульсной модуляции). Он представляет собой интегральное решение для преобразования более высокого входного напряжения в стабильное и пониженное выходное, с высокой эффективностью и малыми потерями энергии в виде тепла.

В отличие от линейных стабилизаторов, которые рассеивают лишнюю мощность в виде тепла, LM2596 работает на частоте около 150 кГц, используя дроссель, диод Шоттки и внешний конденсатор для преобразования энергии. Это позволяет достигать КПД в диапазоне 70–85% в зависимости от условий нагрузки и напряжений [2].

Он поддерживает выходной ток до 2 А (в некоторых модулях — до 3 А с хорошим охлаждением), что делает его пригодным для питания

микроконтроллеров, модулей связи, дисплеев и других устройств, где важна стабильность напряжения при относительно высокой нагрузке.

LM2596 выпускается в нескольких вариантах с фиксированными выходными напряжениями (например, 3.3 В, 5 В, 12 В) и в регулируемой версии (LM2596-ADJ), где выходное напряжение задается с помощью делителя напряжения на внешних резисторах. Регулируемая версия может выдавать напряжение от 1.23 В до примерно 37 В при условии, что входное напряжение выше выходного минимум на 2 В.

Сравнивая LM2596 с аналогичными DC-DC стабилизаторами, можно отметить, что он — одно из наиболее популярных решений из-за своей доступности, простоты применения и обилия готовых модулей, например, на плате с потенциометром для настройки выходного напряжения. Однако у него есть и ограничения: относительно низкая рабочая частота (что требует больших по размеру дросселей и конденсаторов), средняя точность регулировки, а также достаточно большой размер корпуса по сравнению с более современными импульсными стабилизаторами (например, серии MP1584 или TPS5430 от Texas Instruments).

Таким образом, LM2596 — это проверенный временем, надежный и простой в применении понижающий стабилизатор, идеально подходящий для проектов с умеренными требованиями к компактности и эффективности, где важны низкая цена, доступность и простота использования.

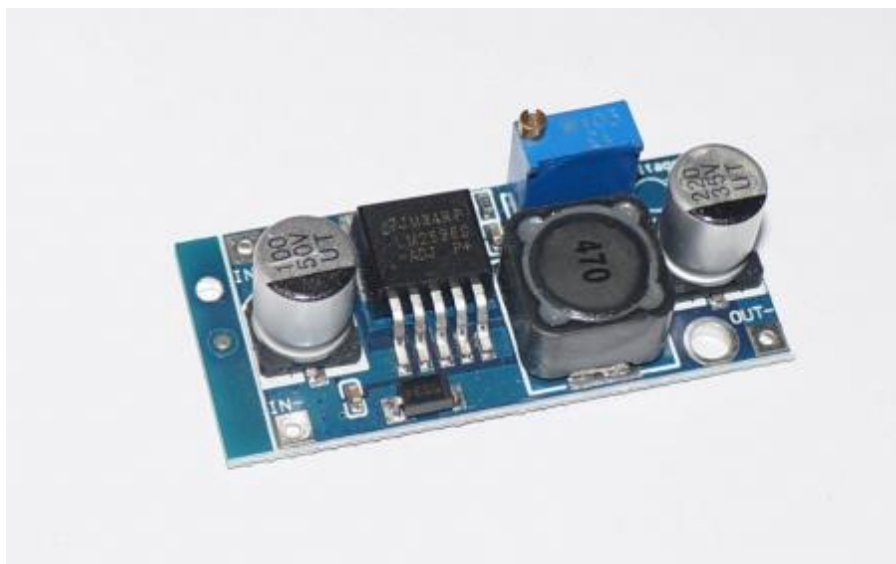


Рисунок 16 – Стабилизатор напряжения LM2596

USR-TCP232-T2 — это миниатюрный последовательный Ethernet-модуль, представленный на рисунке 17, который может реализовать двунаправленную прозрачную передачу данных между портами TTL и RJ45. Он также может применяться в RS232/RS485 с помощью схемы сдвига уровня. Основан на ядре Cortex-M0. Он отличается низкой мощностью, высокой скоростью и высокой эффективностью.

Особенности модуля Ethernet: поддержка DHCP, автоматическое получение IP-адреса и запрос IP-адреса через протокол последовательной настройки, поддержка функции DNS [2].



Рисунок 17 – Конвертер интерфейсов USB-TCP232-T2

На основе подобранных электронных компонентов приступим к проектированию печатной платы. Плата будет из одностороннего текстолита. Разместим на плате микроконтроллер STM32 и конвертер интерфейсов USB-TCP232-T2. Проектирование печатной платы будет произведено в Sprint Layout [18].

Индуктивный датчик LJ12A3-4-Z/BX показан на рисунке 18.



Рисунок 18 – Индуктивный датчик LJ12A3-4-Z/BX

Обмотки шагового двигателя подключаются к соответствующим выходам. Выходные фазы А и В подписываются цифрами в соответствии с началом обмоток шагового двигателя. Питание логической составляющей драйвера на входе VDD варьируется от 3 до 5.5В, что позволяет использовать микроконтроллеры с логическим уровнем 3.3В [3].

Вход ENABLE необходим для выключения драйвера при подаче на него логической единицы 5В. Сброс драйвера осуществляется подтяжкой входа RESET к земле (логический ноль). Для перевода драйвера TB6600 в спящий режим нужно на входе SLEEP установить логическую единицу. Для этого на схеме подключения из рисунка 20 входы RESET и SLEEP соединены, так как сброс подтянут к плюсу питания логики 5В.

В драйвере TB6600 есть функция дробления шага. Микрошаговый режим [9] позволяет увеличить разрешающую способность шагового двигателя. Это позволяет снизить вибрации и избежать резонанса на низких оборотах. Благодаря такому режиму, ротор шагового двигателя можно остановить практически в любом положении, если установить правильное

отношение токов в обмотках.

Вариация микрошага выбирается установкой соответствующего логического уровня на входах S1, S2 и S3. В таблице 1 приведены логические уровни для выбора микрошага.

Таблица 1 – Логические уровни выбора микрошагового режима

S1	S2	S3	Микрошаг
ON	ON	ON	NC
OFF	ON	ON	1/1
ON	OFF	ON	1/2
OFF	OFF	ON	1/2
ON	ON	OFF	1/4
OFF	ON	OFF	1/8
ON	OFF	OFF	1/16
OFF	OFF	OFF	1/32

На рисунке 19 приведены временные диаграммы для микрошагового режима.

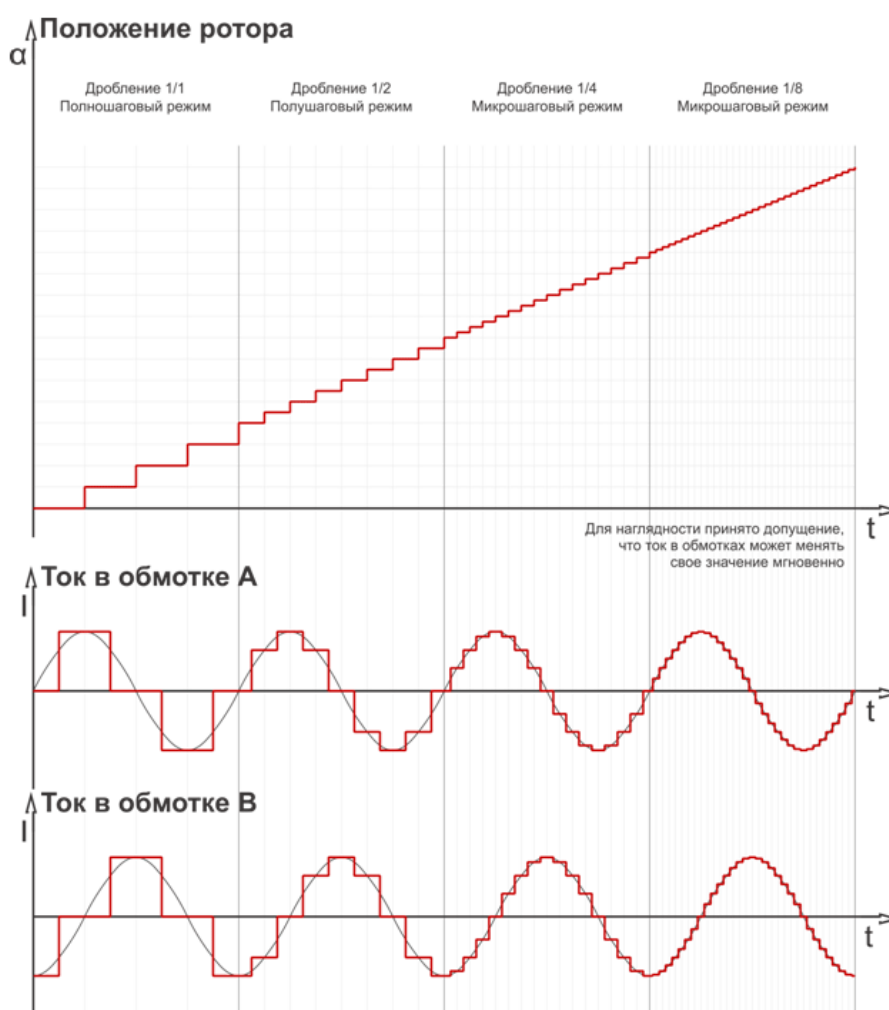


Рисунок 19 – Временные диаграммы микрошагового режима

Увеличение дробления шага способствует росту переключений напряжения и тепловых потерь в обмотках двигателя. Из графика на рисунке 21 можно сделать вывод – повышение дробление шага приведет к снижению момента и максимальной частоты вращения ротора двигателя.

Для управления шаговыми двигателями применялись драйверы TB6600. Это распространенные драйверы двухфазных двигателей [6] в производстве 3D принтеров и ЧПУ станков. Драйвер A4988 способен управлять одним шаговым двигателем с максимальным током 2А на одну фазу в режиме полного или микрошага. Для управления используются входы ENABLE (выключение драйвера), DIR (выбор направления вращения) и STEP (импульсы для инициирования шагов двигателем). На рисунке 20

показан внешний вид драйвера ТВ6600 в таблице 2 приведены характеристики.

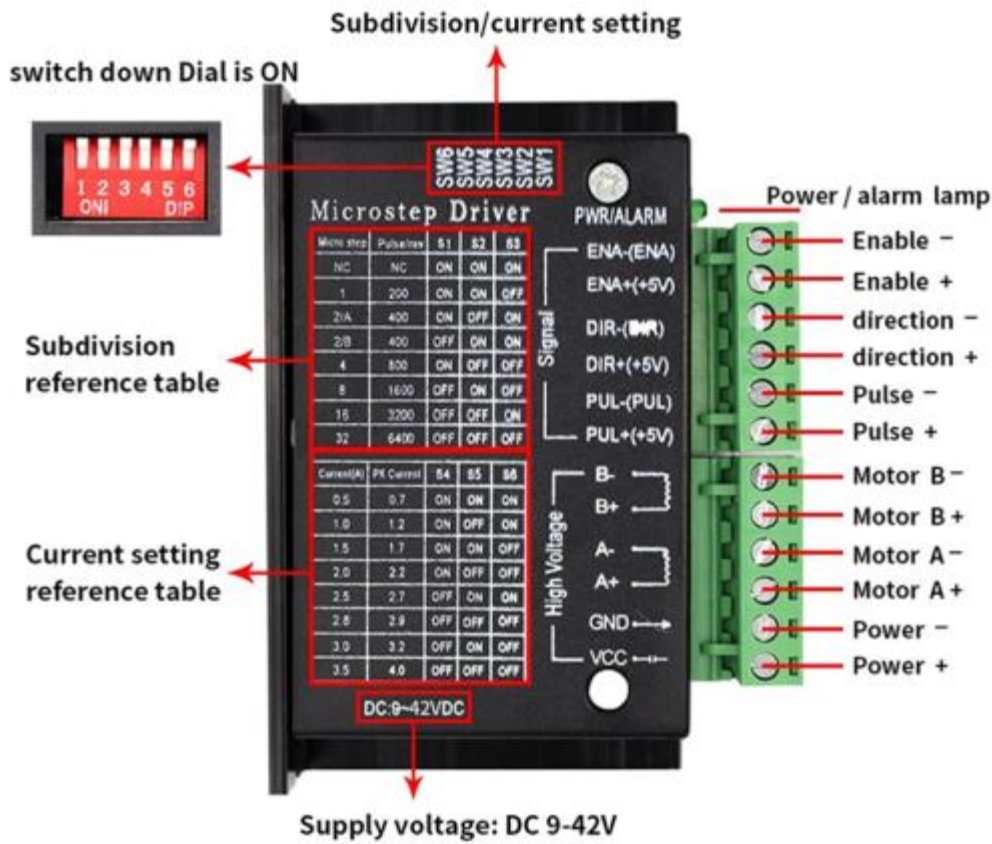


Рисунок 20– Схема подключения драйвера ТВ6600

Таблица 2 – Характеристики драйвера ТВ6600

Напряжение питания двигателя, В	8-35
Напряжение питания логики, В	5
Ток на одну фазу двигателя, А	4
Частота входных импульсов, кГц	до 100
Максимальное деление шага	1:32
Управляющие входы	ENABLE, DIR, STEP
Поддерживаемые двигатели	Nema 23
Рабочая температура, °С	от – 55 до +150

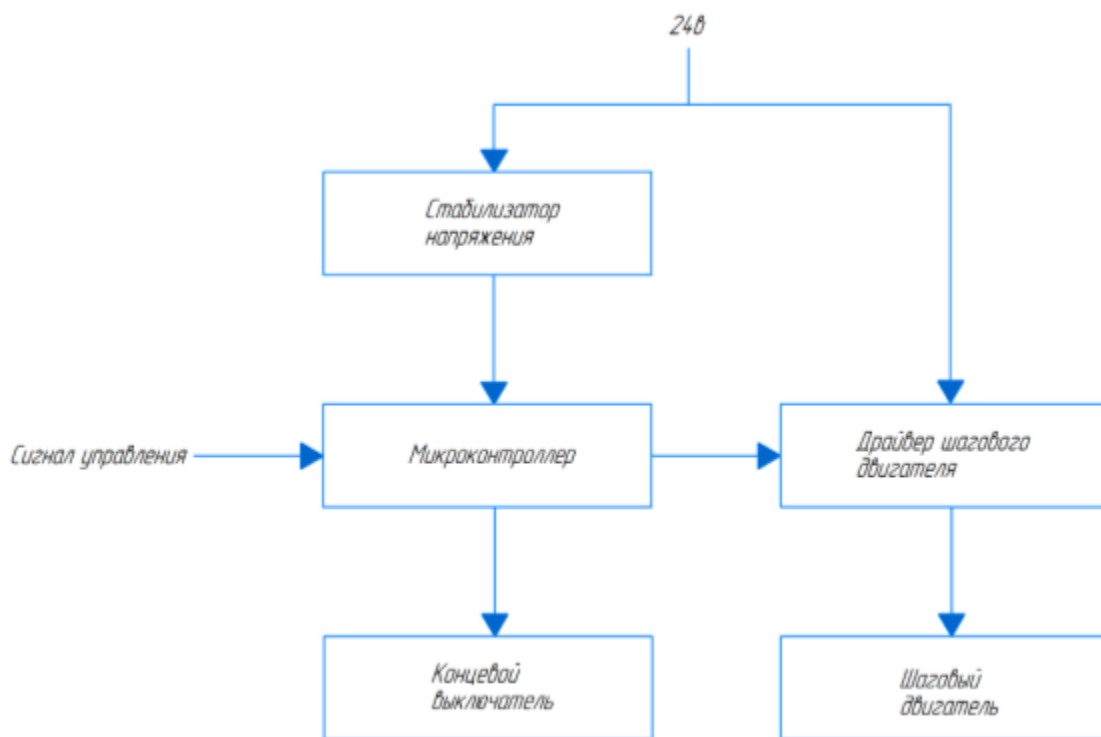


Рисунок 21 – Структурная схема

2.1 Проектирование конструкции устройства

В качестве направляющих были выбраны рельсовые направляющие, так как они обладают высокой точностью и долгим сроком службы. Рельсы изготовлены из закаленной стали. Сборки показаны на рисунке 22 и 23 соответственно.

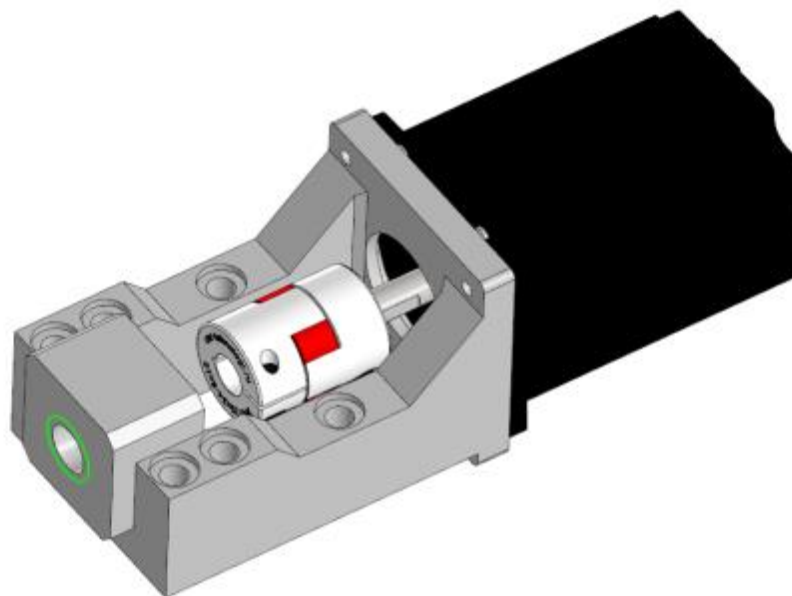


Рисунок 22 – Сборка шагового двигателя с опорой



Рисунок 23 – Сборка кинематики устройства

Приводом оси служит шарико-винтовая передача. ШВП обладает высокой точностью, удобством в монтаже за счет унифицированных корпусных подшипников и корпусов ходовых гаек. Длина шарико-винтовой передачи 1500 мм, длина рельсовых направляющих 1350 мм.

Спроектированная ось движения изображена на рисунке 24.

Для математического моделирования движения оси использовались инженерные расчеты в MATLAB, как описано в источнике [15].

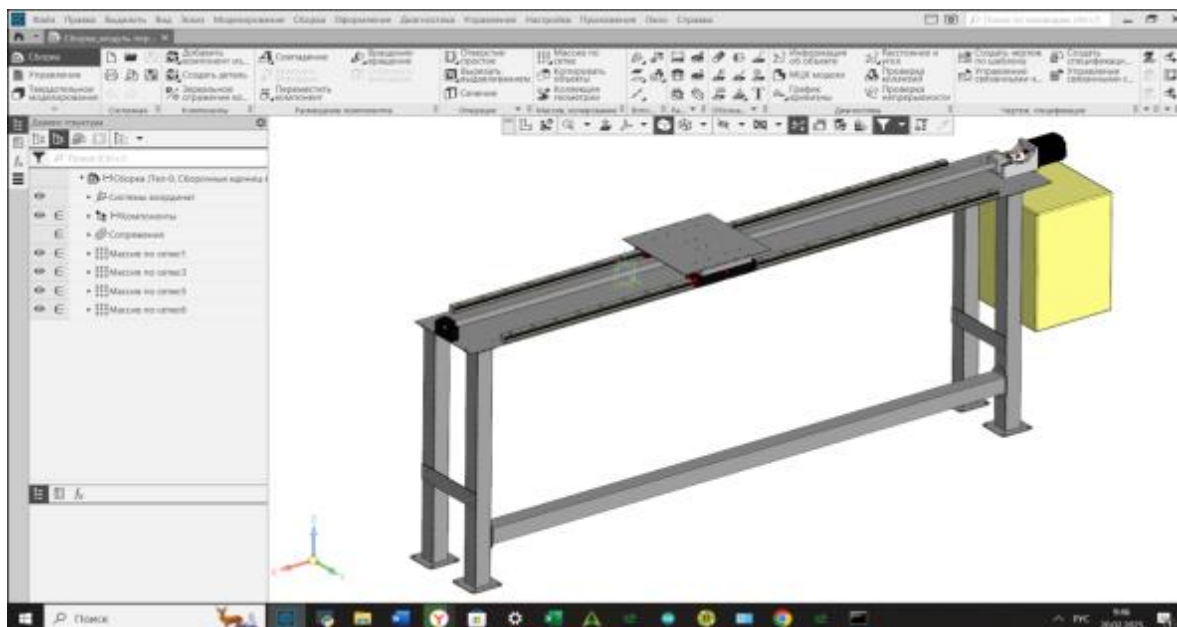


Рисунок 24 – Ось движения

Дополнительная ось движения промышленного робота манипулятора в сборе изображена на рисунке 25.



Рисунок 25 – Ось движения в сборе с роботом манипулятором

2.2 Разработка системы управления

Система управления линейным модулем перемещения представляет собой комплекс аппаратных и программных средств, обеспечивающих реализацию управляющих воздействий на исполнительный механизм – шаговый двигатель, отвечающий за поступательное перемещение манипулятора по оси.

Основной функцией системы управления является прием внешних команд, интерпретация сигналов управления, формирование управляющих импульсов для драйвера шагового двигателя и выполнение алгоритма перемещения с учетом положения каретки и ограничений перемещения.

В качестве вычислительного ядра выбран микроконтроллер STM32F103C8T6, обладающий достаточной производительностью, встроенными аппаратными средствами (UART, таймеры, GPIO), низким энергопотреблением и широкой поддержкой разработчиков.

Микроконтроллер получает команды по интерфейсу UART, к которому подключен модуль преобразования Ethernet-UART USB-TCP232-T2. Это позволяет осуществлять удаленное управление устройством по стандартной локальной сети Ethernet, без необходимости смены аппаратной платформы [6].

Алгоритм управления реализует следующие функции:

- прием команд в односимвольном формате (например, 'F', 'B', 'P', 'S');
- генерация сигналов управления STEP, DIR, EN для драйвера TB6600;
- выполнение движения в заданном направлении на фиксированное количество шагов;
- выполнение функции «парковка» — движение до срабатывания концевого выключателя;
- отключение драйвера в режиме ожидания для снижения потребления и предотвращения нагрева.

Система управления оборудованием включает:

- микроконтроллер STM32F103C8T6 в корпусе LQFP48;
- драйвер TB6600, подключенный к линиям STEP, DIR, EN;
- модуль USB-TCP232-T2, подключенный к USART1 микроконтроллера;
- один концевой выключатель, подключенный к цифровому входу;
- источник питания 12 В, понижающий стабилизатор 3,3 В для питания логики.

Программное обеспечение реализовано с использованием аппаратной библиотеки STM32Cube HAL, что обеспечивает переносимость кода и низкую устойчивость к ошибкам. Управляющие сигналы формируются с использованием программных задержек, а прием команд организован в

режиме прерываний, что позволяет обеспечить высокую отзывчивость системы [19].

Таким образом, система управления обеспечивает реализацию основных функций позиционирования линейного модуля при минимальных затратах и высокой модульности. Архитектура решения допускает расширение: добавление новых датчиков, многоосевое управление, интеграцию в промышленные сети.

```
#include "main.h"
#define STEP_PIN  GPIO_PIN_0
#define STEP_PORT  GPIOA
// Направление вращения
#define DIR_PIN    GPIO_PIN_1
#define DIR_PORT   GPIOA
// Разрешение работы драйвера (активен при низком уровне)
#define EN_PIN     GPIO_PIN_2
#define EN_PORT    GPIOA
// Концевой выключатель (датчик нулевого положения)
#define LIMIT_PIN  GPIO_PIN_3
#define LIMIT_PORT GPIOA
// Переменные для приема и хранения команд
UART_HandleTypeDef huart1;
char command = 'S'; // текущая команда (по умолчанию — "стоп")
uint8_t uart_buf;   // временный буфер приема
// Обратный вызов при приеме байта по UART
void HAL_UART_RxCpltCallback(UART_HandleTypeDef *huart) {
    if (huart->Instance == USART1) {
        // Сохраняем принимаемую команду
        command = uart_buf;
        // Снова запускаем прием для следующей команды
        HAL_UART_Receive_IT(&huart1, &uart_buf, 1);
    }
}
// Функция формирования одного шага
void pulse_step(uint16_t delay_us) {
    HAL_GPIO_WritePin(STEP_PORT, STEP_PIN, GPIO_PIN_SET);
    HAL_Delay(delay_us); // длительность высокого сигнала — ~микшаг
    HAL_GPIO_WritePin(STEP_PORT, STEP_PIN, GPIO_PIN_RESET);
}
```

```

    HAL_Delay(delay_us); // пауза между шагами
}
// Движение заданного числа шагов
void move(uint8_t dir, uint32_t steps) {
    // Устанавливаем направление
    HAL_GPIO_WritePin(DIR_PORT, DIR_PIN, dir);
    // Включаем драйвер (EN = LOW)
    HAL_GPIO_WritePin(EN_PORT, EN_PIN, GPIO_PIN_RESET);
    // Выполняем нужное количество шагов
    for (uint32_t i = 0; i < steps; i++) {
        pulse_step(1); // микрошаговый режим
    }
    // Отключаем драйвер (EN = HIGH)
    HAL_GPIO_WritePin(EN_PORT, EN_PIN, GPIO_PIN_SET);
}
// Функция парковки
void park() {
    // Устанавливаем направление "назад" (концевик в ноль)
    HAL_GPIO_WritePin(DIR_PORT, DIR_PIN, GPIO_PIN_RESET);
    HAL_GPIO_WritePin(EN_PORT, EN_PIN, GPIO_PIN_RESET); // включаем
    драйвер
    // Ожидание с тайм-аутом в 5 секунд
    uint32_t start = HAL_GetTick();
    while (HAL_GPIO_ReadPin(LIMIT_PORT, LIMIT_PIN) == GPIO_PIN_SET)
    {
        pulse_step(1);
        if (HAL_GetTick() - start > 5000) break; // защита по времени
    }
    // Отключаем драйвер
    HAL_GPIO_WritePin(EN_PORT, EN_PIN, GPIO_PIN_SET);
}
int main(void) {
    HAL_Init();
    SystemClock_Config();
    MX_GPIO_Init(); // Настройка GPIO
    MX_USART1_UART_Init(); // UART1 для Ethernet
    // Запускаем прием первых данных по UART
    HAL_UART_Receive_IT(&huart1, &uart_buf, 1);

    // Основной цикл программы
    while (1) {

```

```

switch (command) {
    case 'F': // Двигаться вперед фиксированное количество шагов
        move(GPIO_PIN_SET, 2000);
        break;
    case 'B': // Двигаться назад фиксированное количество шагов
        move(GPIO_PIN_RESET, 2000);
        break;
    case 'P': // Выполнить парковку до срабатывания концевика
        park();
        break;
    case 'S': // Стоп — отключаем драйвер
    default:
        HAL_GPIO_WritePin(EN_PORT, EN_PIN, GPIO_PIN_SET);
        break;
}
// Сброс командной переменной, чтобы не повторять действие
command = 'S';
HAL_Delay(10); // Короткая пауза для устойчивости системы
}
}

```

Выводы по разделу 2

В рамках второго раздела была разработана конструктивно-функциональная основа линейного модуля перемещения, предназначенного для расширения зоны действия промышленного манипулятора.

На основе анализа требований к системе выбраны основные комплектующие:

- направляющие рельсового типа MGN12 для обеспечения точности и жёсткости перемещения;
- привод на основе шарико-винтовой пары Ø8 мм с ходовой гайкой;
- шаговый двигатель NEMA 23 и драйвер TB6600 в качестве исполнительного механизма;
- микроконтроллер STM32F103C8T6 в составе управляющего блока;
- интерфейс Ethernet → UART на базе модуля USB-TCP232-T2.

Сконструирована 3D-модель устройства, определены габаритные размеры, реализовано крепление всех компонентов на единой платформе. В конструкции предусмотрена установка одного концевого выключателя для реализации функции парковки и ограничения хода.

Таким образом, в результате проведённых проектных мероприятий сформирована полноценная конструкция дополнительной линейной оси с системой управления, пригодной для последующей сборки и испытаний. Проект отличается модульностью, простотой интеграции и возможностью адаптации под различные типы манипуляторов [22].

3 Разработка печатных плат

Для реализации аппаратной части системы управления дополнительной линейной осью была разработана печатная плата, предназначенная для размещения микроконтроллера, элементов питания, интерфейсов управления и связи. Печатная плата представляет собой функционально законченное устройство, обеспечивающее формирование сигналов управления, прием сетевых команд и взаимодействие с исполнительными и сенсорными элементами [13].

Структура и компоновка аппаратуры

Центральным элементом схемы управления является микроконтроллер STM32F103C8T6, размещенный непосредственно на плате. Для обеспечения обмена данными с внешней системой управления на плате также установлен модуль Ethernet-UART USB-TCP232-T2. Связь осуществляется по интерфейсу UART1 микроконтроллера.

Питание осуществляется от внешнего источника постоянного тока напряжением 24 В. Для подключения микроконтроллера и управления драйвером TB6600 используется стабилизатор напряжения LM2596. На плате микроконтроллера STM32 установлен линейный стабилизатор AMS1117-3.3, понижающий напряжение до 3,3 В, необходимого для функционирования логических компонентов. Для обеспечения стабильной работы блока питания используются фильтрующие керамические и электролитические конденсаторы.

Управляющие сигналы STEP, DIR и EN выведены на разъемы и подаются на драйвер шагового двигателя TB6600. Предусмотрен один концевой выключатель, необходимый для выполнения функции парковки ПО. На плате установлен индикаторный светодиод, индицирующий текущее состояние системы.

Для подключения внешних проводников используются винтовые клеммники, которые обеспечивают надежную фиксацию проводов без

необходимости пайки. Такое решение удобно для обслуживания и позволяет быстро переподключать внешние компоненты. На рисунке 26 показана принципиальная схема электронного блока управления.

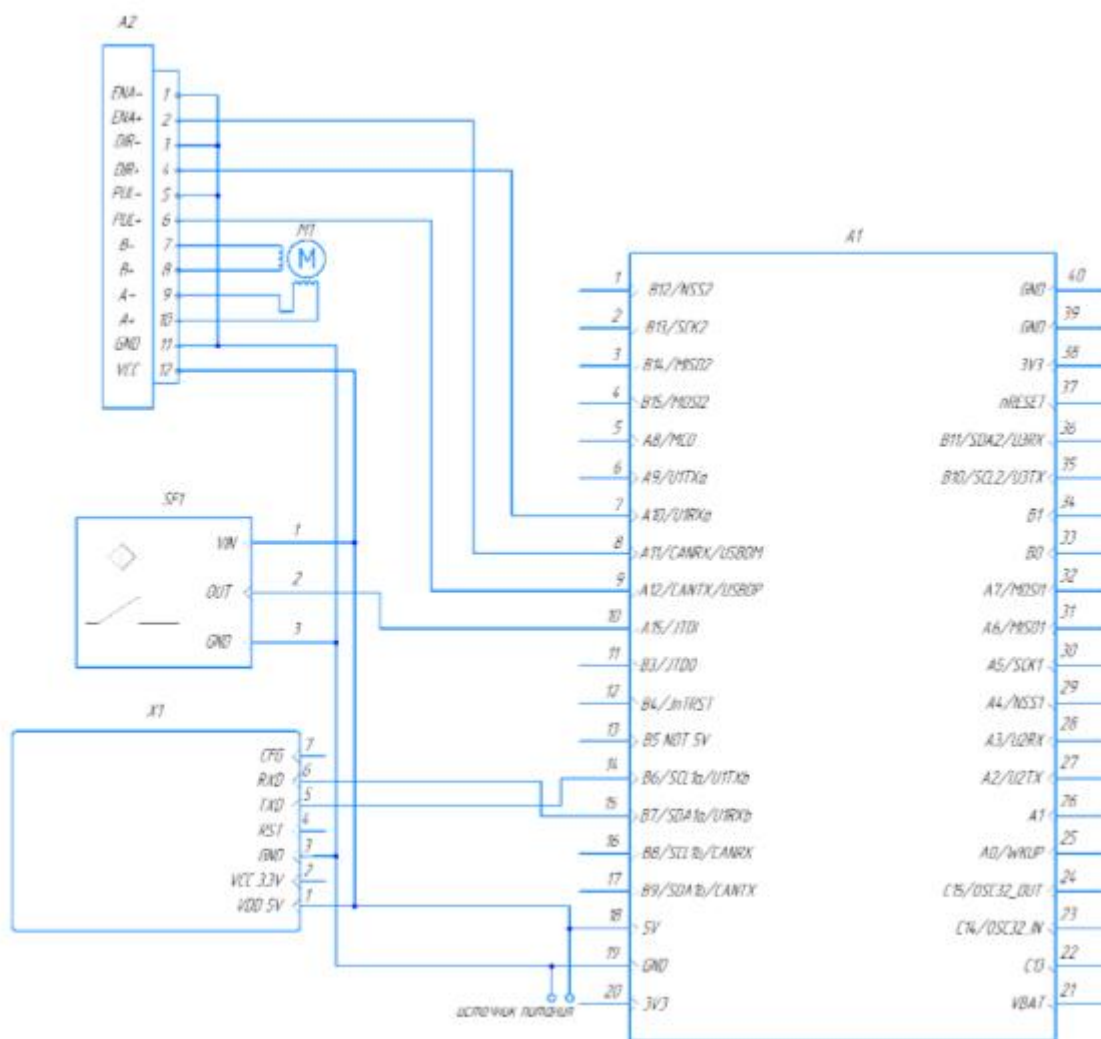


Рисунок 26— Принципиальная схема электронного блока управления

Проектирование и трассировка платы.

Проектирование печатной платы выполнялось в среде Sprint Layout с учетом требований по электромагнитной совместимости, компактности и технологичности. Проектирование выполнено в одностороннем исполнении, все элементы и соединения размещены на нижнем слое [18].

Процесс проектирования включал следующие этапы:

- разработка схемы подключения в графическом редакторе;

- логическая группировка компонентов по функциональным узлам;
- оптимизация размещения для минимизации длины критических трасс (UART, STEP/DIR);
- ручная трассировка дорожек с учетом требований к ширине токоведущих линий;
- проверка ширины зазоров и возможности одностороннего изготовления (без перемычек);
- добавление надписей к выводам и местам крепления.

Особое внимание уделено разводке линий питания и заземления: использованы широкие шины для снижения падения напряжения и снижения импульсных помех. Сигнальные линии STEP, DIR и UART разведены без пересечений и острых углов, что повышает устойчивость работы при импульсной нагрузке. Разводка платы показана на рисунке 27.

Разработанная печатная плата выполняет функцию аппаратного интерфейсного модуля. Она объединяет в себе средства управления, питания и связи, что позволяет подключать исполнительные устройства и датчики напрямую, без необходимости установки дополнительных модулей или разводки на макетной плате.

Форм-фактор и компоновка платы позволяют устанавливать ее в стандартный корпус или монтировать на опорную площадку рядом с исполнительным устройством. Все внешние интерфейсы расположены по периметру, что упрощает монтаж. Плата спроектирована с учетом возможности ручного изготовления в лабораторных условиях, без использования дорогостоящего технологического оборудования.

Таким образом, реализованная печатная плата представляет собой функционально законченный модуль управления, отвечающий поставленным задачам по надежности, простоте подключения и экономичности внедрения.

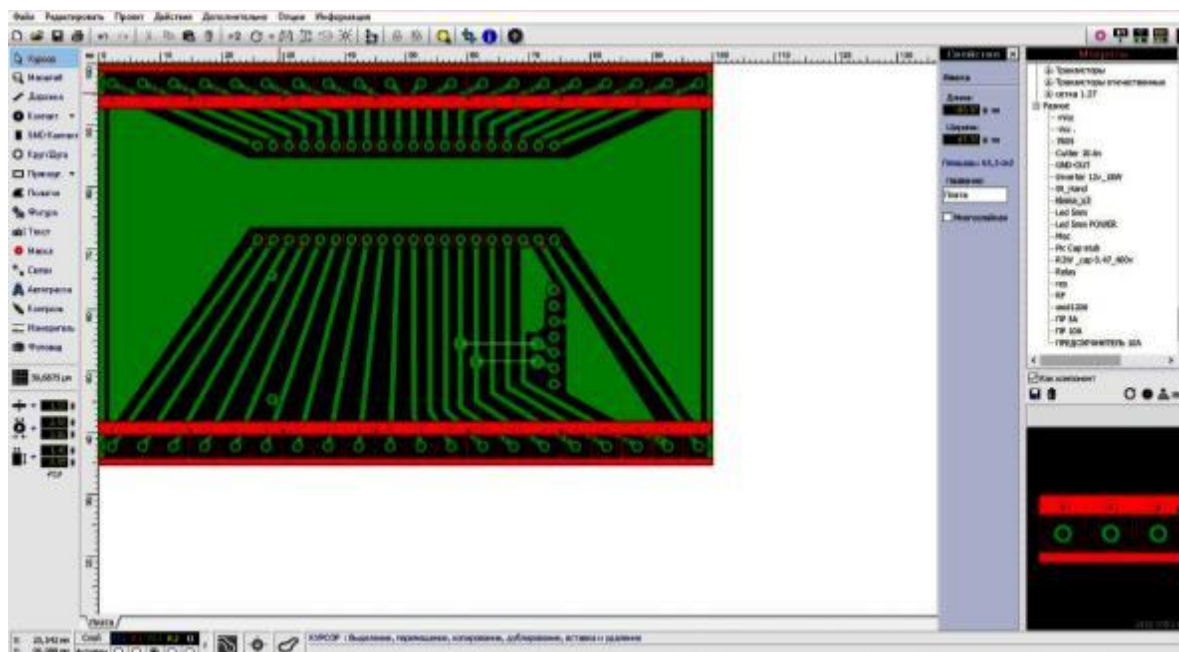


Рисунок 27 – Проектирование печатной платы

Далее изготавливаем печатную плату в домашних условиях. Вытравливаем дорожки, просверливаем отверстия под электронные компоненты. Изготовление показано на рисунке 28.

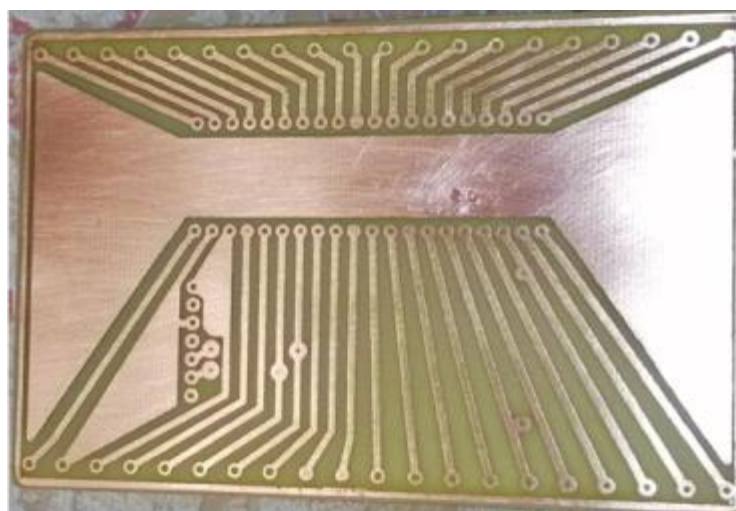


Рисунок 28 – Изготовление печатной платы

Производим установку электронных компонентов. Для удобства подключения используются клеммы с винтовым фиксатором.

Микроконтроллер STM32 и конвертер интерфейсов установлены на штыревые разъемы PBS. Собранная печатная плата показана на рисунке 29.

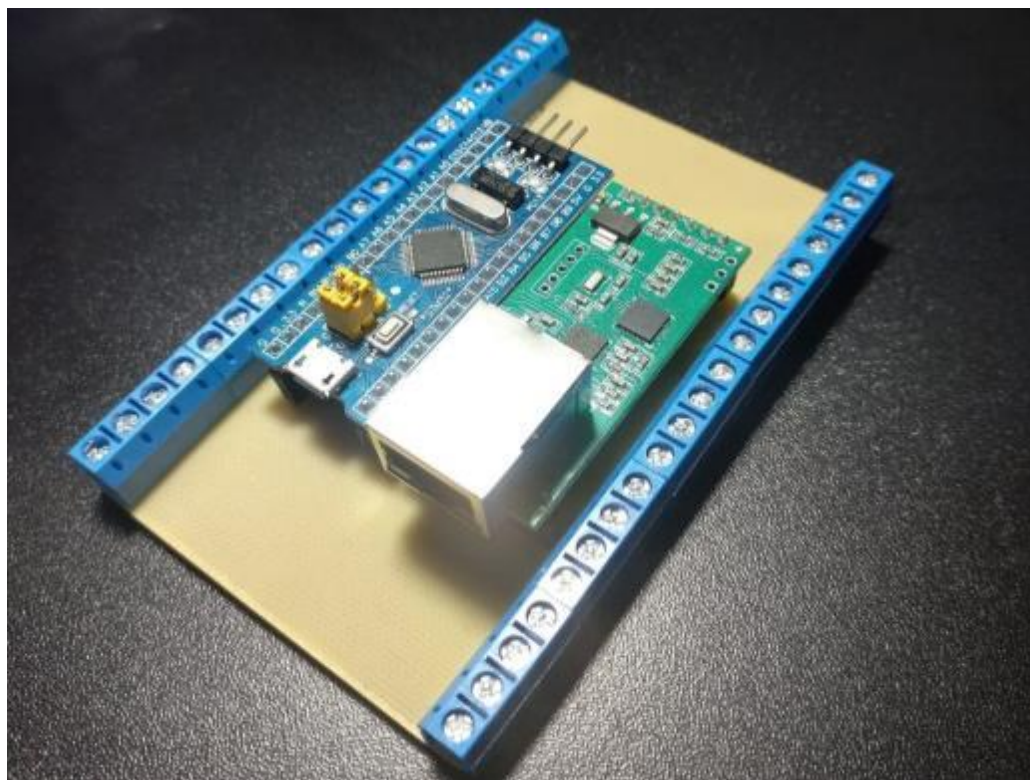


Рисунок 29 – Собранный печатная плата

Выводы по разделу 3

В ходе разработки печатной платы были решены задачи по аппаратной интеграции микроконтроллера, интерфейсов связи и управляющих выходов в рамках одного конструктивного решения. На плате размещены все необходимые функциональные блоки: микроконтроллер STM32F103C8T6, интерфейсный модуль USB-TCP232-T2, стабилизатор питания, сигнальные линии управления и входы обратной связи.

При проектировании устройства были учтены основные требования к электромагнитной совместимости (ЭМС), надёжности коммутации и технологичности изготовления. Трассировка выполнена с минимизацией длин критических цепей, что позволило снизить уровень паразитных наводок

и повысить помехоустойчивость схемы. Широкие шины питания обеспечили минимальное падение напряжения и равномерное распределение тока по плате. Для защиты от возможных перепадов напряжения и коротких замыканий на соответствующих участках цепи установлены дискретные элементы защиты [7].

Печатная плата предназначена для использования в качестве универсального интерфейсного узла (шилда), позволяющего интегрировать управляющую систему с исполнительным модулем без применения дополнительных переходных плат или преобразователей сигналов. Благодаря компактному одностороннему исполнению плата может быть изготовлена в лабораторных условиях с использованием стандартного оборудования для производства печатных плат, что позволяет минимизировать затраты на этапе создания опытного образца и ускорить внедрение устройства в реальные условия эксплуатации.

Заключение

В рамках выполнения выпускной квалификационной работы была разработана система дополнительной линейной оси движения для промышленного манипулятора. Целью проекта являлось расширение функциональных возможностей робототехнической установки за счёт реализации поступательного перемещения манипулятора вдоль заданного направления при помощи внешнего модуля, управляемого по сети Ethernet.

В процессе работы были выполнены следующие задачи:

- проведён обзор существующих решений и выделены требования к системе;
- выбраны доступные комплектующие: рельсовые направляющие, шарико-винтовая пара, шаговый двигатель NEMA 23, драйвер TB6600 и микроконтроллер STM32F103C8T6;
- выполнено 3D-проектирование конструкции линейного модуля;
- разработана электрическая принципиальная схема и печатная плата, включающая в себя микроконтроллер и Ethernet-модуль;
- реализовано программное обеспечение, обеспечивающее выполнение команд: движение вперёд, назад, остановка и парковка;

Особенностью разработанного решения является его модульная структура, возможность удалённого управления через сеть Ethernet и минимальные затраты на реализацию. Плата управления спроектирована в виде универсального интерфейсного модуля, выполняющего функции "шилда" для внешнего драйвера и сенсоров, что упрощает интеграцию в различные робототехнические комплексы. Данная работа позволяет внедрять гибкие автоматизированные комплексы на производственные участки, где загрузка обрабатывающего оборудования не позволяет создать автоматизированные ячейки, но при этом позволяет использовать промышленный манипулятор для повышения эффективности группы оборудования.

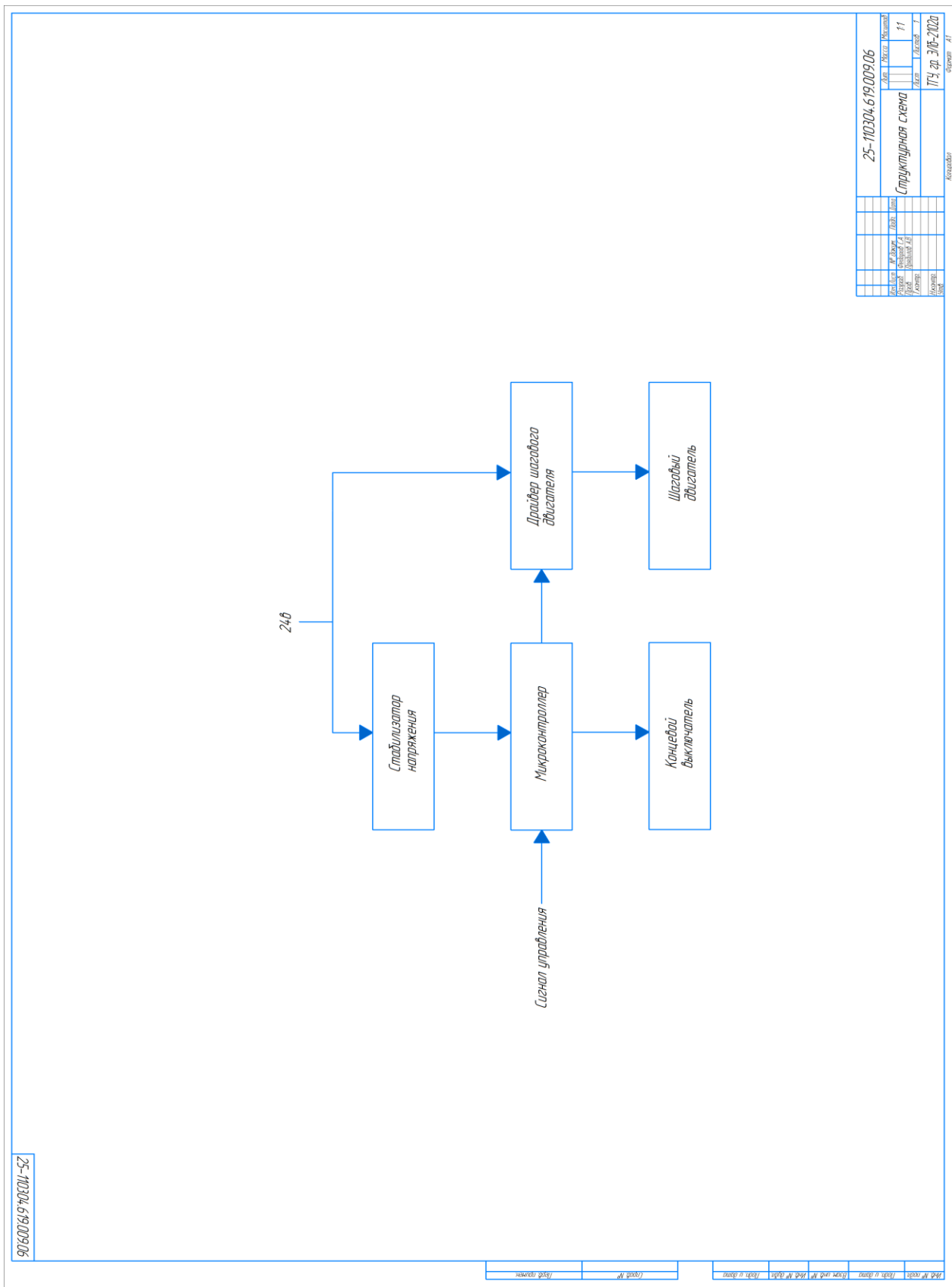
Список используемой литературы

1. Алексеев А.В., Калмыков А.А. Промышленные роботы и манипуляторы: учебное пособие / под ред. А.А. Калмыкова. — М.: Высшая школа, 2019. — 320 с.
2. Антонов В.Ф., Бабенко Л.К. Основы автоматизации производства: учебник для вузов. — СПб.: Лань, 2020. — 416 с.
3. Белов М.П. Автоматизированный электропривод станков и промышленных установок: учебник для вузов. — М.: Академия, 2018. — 432 с.
4. Болотовский В.А. Шаговые двигатели: теория, расчёт, применение. — М.: Техносфера, 2021. — 256 с.
5. Горошко В.А., Суханов А.П. Электромеханические системы промышленных роботов. — М.: Машиностроение, 2019. — 304 с.
6. Дьяконов В.П. STM32F103. Самоучитель программирования на языке С. — М.: СОЛОН-Пресс, 2020. — 368 с.
7. Жданов В.Н., Козлов В.М. Микроконтроллеры STM32: архитектура, программирование, разработка устройств. — М.: ДМК Пресс, 2021. — 448 с.
8. Зайцев С.А. Электроника в задачах и проектах. — М.: Инфра-Инженерия, 2018. — 300 с.
9. Иванов И.И., Петров П.П. Устройства управления шаговыми двигателями: справочник. — СПб.: Наука и Техника, 2020. — 288 с.
10. Казакевич А.М. Программирование микроконтроллеров STM32F103C8T6: практика без лишних слов. — М.: ДМК Пресс, 2021. — 224 с.
11. Климов В.С., Нестеров А.И. Промышленная электроника: учебник. — М.: Академия, 2019. — 400 с.
12. Колдаев В.Д. Основы автоматики и электропривода промышленных роботов. — М.: Высшая школа, 2018. — 384 с.

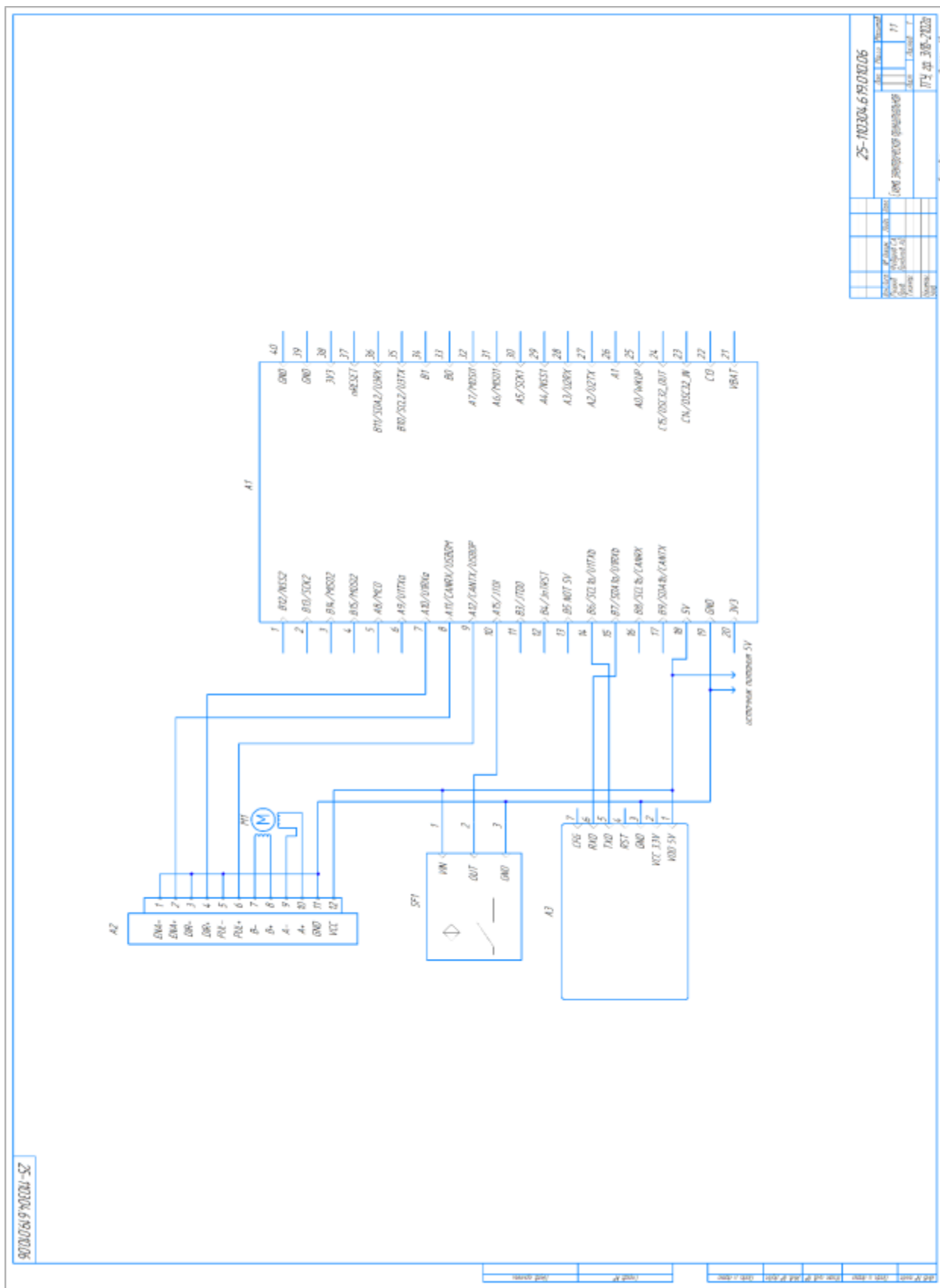
13. Куренков П.В. Электроника. Учебный курс для начинающих. — М.: Горячая линия — Телеком, 2020. — 360 с.
 14. Лебедев О.Н., Смирнов Ю.А. Микроконтроллеры в системах автоматического управления. — М.: Техносфера, 2021. — 336 с.
 15. Макаров Е.Г. Инженерные расчёты в MATLAB. — М.: Питер, 2019. — 320 с.
 16. Максимов Б.К., Филиппов А.А. Системы управления промышленными роботами. — М.: Машиностроение, 2020. — 416 с.
 17. Опадчий Ю.Ф., Глудкин О.П. Аналоговая и цифровая электроника: учебник для вузов. — М.: Горячая линия — Телеком, 2018. — 768 с.
 18. Панфилов С.И., Смирнов А.А. Разработка печатных плат в Sprint Layout. — М.: СОЛОН-Пресс, 2020. — 240 с.
 19. Kalman, R.E. A New Approach to Linear Filtering and Prediction Problems / R.E. Kalman // Journal of Basic Engineering. – 1960. – Vol. 82. – P. 35–45.
 20. Ogata, K. Modern Control Engineering / K. Ogata. – 5th ed. – Upper Saddle River: Prentice Hall, 2010. – 928 p.
 21. Nof, S.Y. Springer Handbook of Automation / S.Y. Nof. – Berlin: Springer, 2017. – 1580 p.
 22. Siciliano, B. Robotics: Modelling, Planning and Control / B. Siciliano et al. – London: Springer, 2010. – 632 p.
 23. Groover, M.P. Fundamentals of Modern Manufacturing: Materials, Processes, and Systems / M.P. Groover. – Hoboken: Wiley, 2019. – 1152 p.
- Хрусталёв О.А. Проектирование мехатронных модулей промышленных роботов. — М.: Машиностроение, 2019. — 320 с.

Приложение А

Структурная схема



Приложение Б Принципиальная электрическая схема



Приложение В

Перечень элементов

[illegible]