

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 Робот для диагностики трубопроводов с неизвестной топологией

Обучающийся

Р. И. Грачев

(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)

Тольятти 2025

Аннотация

Название бакалаврской работы: «Робот для диагностики трубопроводов с неизвестной топологией».

Объём работы 51 страниц, 33 рисунков, 20 источников.

Объект исследования: Робот для диагностики трубопроводов.

Цель работы: Разработка прототипа внутритрубного роботизированного комплекса, предназначенного для автономного передвижения по трубопроводу с возможностью адаптации к переменному диаметру и передачи диагностических данных по Ethernet-кабелю.

Задачи работы:

- анализ существующих технических решений в области трубных диагностических систем;
- разработка конструкции модульного робота и кабельной катушки;
- проектирование механических и приводных узлов;
- подбор электронных компонентов, датчиков и исполнительных механизмов;
- разработка электронного блока управления на базе микроконтроллера STM32;
- проектирование и изготовление печатной платы;
- разработка низкоуровневого программного обеспечения для управления внутритрубным модулем.

Степень внедрения: Подобраны комплектующие, спроектированы и изготовлены механические узлы, низкоуровневое программное обеспечение и электронная часть устройства.

В работе представлено устройство, предназначенное для обследования трубопроводов диаметром от 200 до 400 мм. для автоматизации инспекционных работ в инженерных сетях [12].

Abstract

Bachelor's thesis title: "Robot for diagnostics of pipelines with unknown topology" Volume of work: 51 pages, 32 drawings, 20 sources.

Object of research: Pipeline diagnostic robot The purpose of the work: To develop a prototype of an in-tube robotic complex designed for autonomous movement through a pipeline with the ability to adapt to variable diameters and transmit diagnostic data via an Ethernet cable.

Work objectives:

- analysis of existing technical solutions in the field of tube diagnostic systems;
- design development of a modular robot and a cable coil;
- design of mechanical and drive units;
- selection of electronic components, sensors and actuators;
- development of an electronic control unit based on the STM32 microcontroller;
- design and manufacture of a printed circuit board;
- development of low-level software for controlling the in-tube module.

The degree of implementation: Components have been selected, mechanical components, low-level software and the electronic part of the device have been designed and manufactured. The paper presents a device designed to inspect pipelines with a diameter of 200 to 400 mm. for automation of inspection work in engineering networks.

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.....	7
2. Подбор комплектующих.....	9
2.1. Проектирование внутритрубного модуля устройства.....	21
2.2. Проектирование внешнего модуля устройства.....	33
2.3. Разработка системы управления.....	37
3. Разработка печатных плат	40
Заключение	51
Список используемой литературы	52

Введение

Современное состояние городских инженерных систем, включая теплосети, требует регулярной диагностики и профилактики. Значительная часть трубопроводов эксплуатируется с превышением нормативных сроков службы, при этом зачастую отсутствует актуальная техническая документация, а топология участков может быть неизвестной [10].

Настоящая работа посвящена разработке роботизированной системы, предназначенной для видеодиагностики трубопроводов диаметром 200–400 мм. Разработка ориентирована на те участки сети, которые недоступны для существующих промышленных решений, и обеспечивает передачу видеопотока в реальном времени, модульную адаптацию к диаметру и возможность последующего масштабирования до системы с автоматизированной навигацией и дефектоскопией [4].

Цель работы — разработка роботизированной модульной платформы для видеодиагностики трубопроводов с неизвестной топологией, работающей в диапазоне диаметров 200–400 мм, с Ethernet-связью и возможностью адаптации к изменяющимся геометрическим условиям трубы.

Для достижения цели поставлены следующие задачи:

- провести анализ существующих решений в области роботизированной диагностики трубопроводов;
- разработать конструкцию платформы, обеспечивающей адаптацию к диаметру и прохождению поворотов;
- спроектировать электронную часть на базе микроконтроллера STM32 и интерфейса Ethernet;
- разработать и отладить прошивку для управления движением и связью;
- спроектировать печатные платы, произвести подбор компонентной базы.

1. Состояние вопроса

1.1 Формулирование цели и задач проекта

На практике для диагностики тепловых трубопроводов применяются такие методы, как ультразвуковая дефектоскопия, индукционная дефектоскопия и ультразвуковая эмиссия. Несмотря на высокую точность этих методов, они требуют использования дорогостоящего оборудования, специализированной подготовки персонала и значительного времени на интерпретацию результатов. Более того, в условиях сложной топологии трубопровода или при отсутствии доступа к необходимым участкам, их применение становится затруднительным [9].

Видеодиагностика обладает преимуществами технологической простоты, быстрого развертывания и высокой информативности. С её помощью возможно выявление большого количества дефектов на начальной стадии, а также оценка степени загрязнения, наличия отложений или засоров. Кроме того, использование видеокамер с передачей изображения в режиме реального времени существенно упрощает работу операторов и позволяет принимать решения немедленно, без длительного анализа [4].

В трубопроводах малого диаметра (200–400 мм), особенно на сложных участках сети с поворотами и изменениями конфигурации, невозможно применение тяжёлых промышленных роботов. Разработка лёгкой, модульной и адаптивной платформы является необходимым условием для эффективной диагностики таких участков, особенно в коммунальной сфере (ЖКХ, водоканалы, теплосети) [1].

Работа основывается на современных принципах мехатроники и робототехники, изложенных в работах Алексеева А.В., Беспалова А.Н., Корендясева А.И., Челпанова И.Б. [1, 2, 7, 13], а также стандартах, определяющих термины и классификацию робототехнических устройств [3].

1.2. Анализ исходных данных и существующих решений

Для обоснования актуальности разработки были проанализированы современные роботы для внутритрубной диагностики – как промышленные, так и исследовательские:

Diakont RODIS / RODIS-18 – российский модульный робот для инспекции труб диаметром 200...1400 мм. Оборудован несколькими NDE-модулями: ультразвук EMAT, лазерная профилометрия, камера, способен преодолевать повороты до 90° и изменения диаметра без вмешательства внешних устройств.

RedZone SOLO – робот на гусеницах для труб диаметром 200–300 мм, оснащён панорамной камерой с поворотом и зумом, автономен, развёртывается менее чем за 15 мин и обеспечивает съёмку до 1500 м в день.

Sigma 200 HD / HD-LR – модульные роботы с подъёмной камерой, лазерным измерением дефектов, Bluetooth/Wi-Fi, камерой с поворотом/наклоном, кабельной катушкой до 1700 м, рассчитаны на трубы диаметром от 200 до 3000 мм.

1.3. Определение концепции

Предлагаемая система представляет собой трёхсекционный внутритрубный робот с гусеничным приводом и внешним модулем подачи питания и связи:

Внутритрубный модуль состоит из трёх частей:

Два крайних сегмента содержат гусеничные модули с электроприводами и механизмом прижима;

Центральный сегмент включает: STM32, Ethernet-модуль, POE-камеру и сетевой коммутатор.

Привод и адаптация: привод на базе трапециевидной шпильки и гайки приводит в движение ножничный механизм, изменяющий ширину

гусеничной базы. Давление от каретки обеспечивает прижим гусениц к трубе. Гусеницы выполнены из TPU и работают без внешнего охлаждения.

Связь и питание: осуществляется через Ethernet-кабель с катушкой на внешнем модуле. Длина кабеля — до 150 м. Питание подаётся по кабелю (48 В), передача данных осуществляется через модуль USB-TCP232-T2 и Ethernet-коммутатор.

Гибкость конструкции: соединения между модулями выполнены с использованием резиновой гофры, что позволяет проходить изгибы труб и компенсировать неровности.

Обратная связь: реализована через датчики Холла на приводах изменения диаметра. При срабатывании обеспечивается защита от перегрузки и автоматическая остановка движения.

Будущее развитие: предполагается реализация системы автономной навигации, построения карты обследованной зоны и интеграция модулей ультразвуковой и индукционной дефектоскопии.

Вывод по разделу 1

В результате анализа текущих потребностей теплосетей и существующих инженерных решений выявлена необходимость создания специализированной роботизированной платформы для видеодиагностики трубопроводов диаметром 200–400 мм. Разработка ориентирована на обеспечение высокой проходимости, простоты в управлении и возможности передачи видеоинформации в реальном времени.

Проведённый обзор аналогов подтвердил отсутствие недорогих, компактных и адаптивных решений, ориентированных на трубопроводы с ограниченным доступом. Концепция предлагаемой системы отвечает требованиям практической диагностики: она модульна, экономична, конструктивно проста и пригодна для эксплуатации в условиях ЖКХ и теплосетей.

2. Подбор комплектующих

В конструкции робота для трубопроводов с переменным внутренним диаметром используется трапецевидная гайка типоразмера Т8, показанная на рисунке 1, которая работает в паре с соответствующей трапецевидной шпилькой и BLDC-двигателем. Эта пара образует линейный привод, преобразующий вращательное движение двигателя в поступательное перемещение каретки многорычажной кинематики. Такая конструкция позволяет роботу адаптироваться к ходовому модулю под диаметр инспектируемого трубопровода.



Рисунок 1 – Ходовая гайка Т8 с трапецевидным винтом

В проекте диагностического робота для трубопроводов с неизвестной топологией в качестве основного управляющего элемента используется отладочная плата, основанная на 32-разрядном микроконтроллере STM32G070RBT6 семейства STM32G0 от STMicroelectronics обладает достаточными вычислительными ресурсами для выполнения задач управления движением и передачи данных [6]. Этот микроконтроллер, показанный на рисунке 2, отвечает за обработку сигналов от датчиков,

управление исполнительными механизмами, реализацию протоколов связи, а также взаимодействие с внешними модулями.

STM32G070RBT6 оснащён ядром ARM Cortex-M0+ с тактовой частотой до 64 МГц, содержит 128 КБ флеш-памяти и 36 КБ оперативной памяти SRAM, чего вполне достаточно для выполнения задач управления движением, мониторинга, связи и принятия решений в реальном времени. Одним из его ключевых преимуществ является широкий набор периферийных интерфейсов, таких как UART, SPI, IC, ADC, PWM и GPIO, что делает микроконтроллер универсальным и удобным для построения встраиваемых систем.

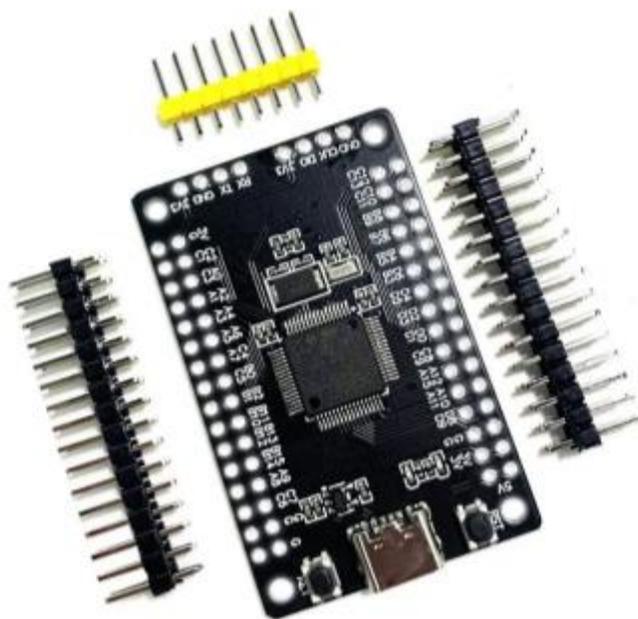


Рисунок 2 – Отладочная плата STM32G070RBT6

Предлагается построить локальную Ethernet-сеть внутри модуля, используя 5-портовый коммутатор ANDDEAR-5-8, показанный на рисунке 3. К порту коммутатора подключается внешний кабель-трос от базового модуля, а к другим портам – камера и контроллер. Таким образом, IP-камера S200N-MY и Ethernet-интерфейс STM32 окажутся в одном сегменте сети, объединённом коммутатором [10]. Коммутатор будет прозрачно пересылать

пакеты между внешним модулем, камерой и микроконтроллером. Это позволит по единственному кабелю передавать одновременно видеопоток с камеры и управляющие команды/телеметрию от STM32.



Рисунок 3 – Сетевой коммутатор ANDDEAR-5-8

USR-TCP232-T2 — это модуль преобразования интерфейса UART - Ethernet, который используется в проекте диагностического робота в качестве ключевого компонента для организации удалённого сетевого взаимодействия между микроконтроллером STM32G070RBT6 и внешним операторским постом. Конвертер позволяет подключать микроконтроллер, работающий по последовательному порту (UART), к Ethernet-сети с поддержкой протокола TCP/IP, что особенно важно при передаче телеметрических данных и команд управления в реальном времени.

Модуль выполнен в компактном форм-факторе и может быть размещён непосредственно на печатной плате-шилде вместе с отладочной платой STM32. Интерфейс подключения к микроконтроллеру осуществляется через стандартные TX и RX линии UART. На стороне Ethernet модуль поддерживает 10/100 Мбит/с соединение, что обеспечивает достаточную

пропускную способность для передачи данных от датчиков и управляющих команд.

Основные характеристики USB-TCP232-T2:

- напряжение питания: 3.3 В или 5 В (в зависимости от конфигурации);
- поддержка DHCP и статического IP-адреса;
- работа в режиме TCP-клиент, TCP-сервер или UDP;
- скорость UART до 230.4 кбит/с;
- аппаратный буфер FIFO для приёма/передачи данных;
- защита от электромагнитных помех и перегрузок по току.

В рамках проекта конвертер установлен как во внутритрубном модуле, так и во внешнем. Такая унификация позволила не только сократить номенклатуру закупаемых компонентов, но и упростить схему подключения, снизить стоимость разработки и обеспечить единый интерфейс для взаимодействия модулей с компьютером оператора. Через Ethernet-соединение передаются текущие значения с датчиков, сигналы с двигателей и диагностическая информация.

Конвертер USB-TCP232-T2, показанный на рисунке 4, показал высокую надёжность работы в условиях электромагнитных помех, ограниченного пространства и нестабильного питания, что делает его идеальным решением для встроенных систем в робототехнике и промышленной автоматике.

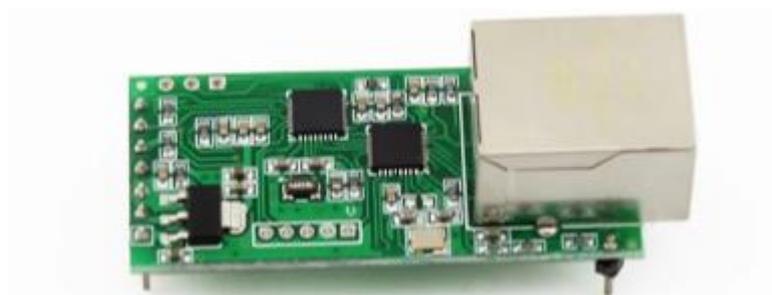


Рисунок 4 – Конвертер интерфейсов USB-TCP232-T2

Камера S200N-MY с поддержкой технологии POE (Power over Ethernet), показанная на рисунке 5, предназначена для визуального контроля внутреннего состояния трубопроводов и используется в конструкции 1-ого модуля диагностического робота. Она установлена в передней части робота и обеспечивает видеонаблюдение в реальном времени на протяжении всего пути его движения по трубопроводу.

Камера выполнена в цилиндрическом корпусе с высокой степенью герметичности, что позволяет использовать её в условиях повышенной влажности и загрязнённости. Благодаря применению широкоугольного объектива и высокой светочувствительности сенсора, устройство обеспечивает чёткое изображение даже в условиях слабой освещённости или полного отсутствия внешнего света. Возможна интеграция с инфракрасной подсветкой при необходимости.

Основной особенностью камеры является технология POE, позволяющая передавать как видеосигнал, так и питание по одному витому кабелю Ethernet. Это упрощает компоновку системы, снижает количество соединений и увеличивает надёжность при эксплуатации в ограниченных пространствах. Подключение камеры осуществляется через сетевой коммутатор ANDDEAR-5-8, установленный в центральной части модуля.

Камера S200N-MY обеспечивает потоковое видео в цифровом формате с разрешением до 1920×1080 пикселей при частоте до 30 кадров в секунду, что достаточно для оперативной оценки состояния труб. Передача изображения осуществляется по протоколу TCP/IP и может быть отображена в реальном времени на операторском посту или записана на внешний носитель.



Рисунок 5 – POE-камера S200N-MY

Модель MY36GP-3626, показанная на рисунке 6, представляет собой компактный бесщёточный электродвигатель постоянного тока (BLDC), предназначенный для применения в системах, требующих высокой надёжности, стабильности крутящего момента и длительной работы в замкнутом пространстве [8]. Этот двигатель является оптимальным решением для мобильных роботов, таких как внутритрубные диагностические платформы, благодаря сочетанию малых габаритов и достаточного запаса мощности.

Корпус двигателя выполнен из алюминиевого сплава, что способствует эффективному отводу тепла при непрерывной работе. Модель оснащена прецизионным редуктором, встроенным в корпус, что позволяет сразу получить высокий крутящий момент при относительно низких оборотах. Это особенно важно при приводе гусеничных модулей, где требуется значительное тяговое усилие при движении по трубопроводу.

Особенностью MY36GP-3626 является наличие встроенных датчиков Холла, позволяющих точно определять положение ротора. Эти сигналы

необходимы для реализации замкнутого контура управления (с обратной связью) и плавного регулирования скорости. Сигналы датчиков Холла передаются на управляющий микроконтроллер через отдельную линию, что обеспечивает синхронизацию фаз и устойчивость вращения при переменных нагрузках.

Двигатель имеет пять сигнальных проводов:

VCC — питание обмоток;

GND — общий провод;

PWM — сигнал управления скоростью (широтно-импульсная модуляция);

Reverse — направление вращения вала;

FG (Frequency Generator) — сигнал с датчика Холла (обратная связь по частоте вращения).

Типовое напряжение питания двигателя — 12–24 В, номинальная потребляемая мощность зависит от нагрузки, но, как правило, не превышает 25–30 Вт. Конструктивно предусмотрено использование в паре с редуктором, что расширяет область применения, включая робототехнику, приводы укладки кабеля, а также адаптивные механизмы с линейным перемещением.

В рамках данного проекта двигатель применяется в:

- приводе гусеничных блоков;
- механизме разжатия многорычажной кинематики (через трапецевидную шпильку).



Рисунок 6 – Бесколлекторный двигатель MY36GP-3626

Во внешнем модуле роботизированной системы, предназначенной для укладки и перемещения кабеля, применяются скользящие кольца MOFLON, показанные на рисунке 7, на 6 каналов с допустимым током до 20 А на канал. Эти кольцевые токопередающие устройства обеспечивают надёжную передачу электрического питания и сигнальных линий между вращающейся и неподвижной частями механизма — в данном случае между неподвижным источником питания и вращающейся катушкой, наматывающей кабель.

Применение скользящего контакта MOFLON позволило реализовать непрерывное вращение катушки в любом направлении без риска перекручивания или повреждения кабеля. Из шести каналов устройства два используются для подачи электропитания на исполнительные устройства внутритрубного модуля, а оставшиеся четыре — для передачи Ethernet, соединяющую внешний и внутренний модули через коммутатор.

Контактные поверхности устройства изготовлены из благородных металлов, что обеспечивает минимальное сопротивление, устойчивость к

износу и стабильную передачу сигнала, включая высокочастотные данные. Благодаря модульной конструкции скользящие контакты MOFLON легко интегрируются в корпус катушки и обеспечивают электромеханическую развязку между подвижной и стационарной частью, критически важную для обеспечения надёжной работы в условиях постоянных механических нагрузок и вращения.



Рисунок 7 – Скользящие контакты MOFLON

В элементах движущейся части робота, таких как гусеничные катки и сочленённые рычаги, применяются радиальные подшипники с фланцем, показанные на рисунке 8. Эти подшипники служат для обеспечения надёжной опоры вращающихся осей и валов, снижая трение и износ в условиях переменной нагрузки. Конструкция подшипников включает в себя наружное кольцо с монтажным фланцем, позволяющим удобно и жёстко закреплять элемент в листовом металле, изготовленном методом лазерной резки. Фланец предотвращает осевое смещение подшипника и облегчает позиционирование в корпусе.

Радиальные фланцевые подшипники обладают компактными габаритами и высокой грузоподъёмностью при радиальной нагрузке, что особенно важно для узлов, подвергающихся постоянной вибрации и инерционным усилиям при движении робота внутри трубопровода. Применение фланцевых подшипников позволило упростить конструкцию и сборку рычажных механизмов, обеспечивая надёжность вращения при минимальном техническом обслуживании и длительном сроке службы.



Рисунок 8 – Радиальный подшипник с фланцем

Для подключения бесщёточных электродвигателей (BLDC), установленных в гусеничных модулях, применяются герметичные разъёмы AMP, показанные на рисунке 9, с классом защиты IP67. Эти соединители обеспечивают надёжную работу в условиях повышенной влажности и загрязнений, соответствуя требованиям эксплуатации внутри трубопровода. Разъёмы обеспечивают быстросъёмное соединение между силовыми и управляющими цепями двигателей и электроникой управления, облегчая демонтаж, обслуживание и замену гусеничных модулей. Каждый разъём передаёт питание, сигнал направления, управления скоростью (PWM) и сигнал обратной связи от датчиков Холла (FG), обеспечивая стабильную

работу приводной системы даже при воздействии вибраций и механических нагрузок.



Рисунок 9 – Контакты AMP

В конструкции механизма вращения катушки во внешнем модуле установки применяется подшипниковый узел UCFC204, показанный на рисунке 10, с фланцевым креплением. Данный узел представляет собой корпусной радиальный шариковый подшипник с круглым наружным корпусом и четырьмя монтажными отверстиями для крепления к несущей поверхности. Основу узла составляет вставной подшипник серии UC204, установленный в литой корпус из чугуна марки GGG40, что обеспечивает высокую прочность и устойчивость к вибрациям и нагрузкам, возникающим при вращении катушки с кабелем.

Подшипниковый узел оснащён эксцентриковым кольцом и стопорным винтом, что позволяет надёжно фиксировать вал и исключить проворачивание в посадочном отверстии. Внутренний диаметр подшипника составляет 20 мм, что соответствует стандартному валу, применяемому в данной конструкции. UCFC204 обеспечивает плавное вращение при низких и средних скоростях, а также легко обслуживается за счёт наличия смазочного канала для технического обслуживания.

Применение фланцевого узла данной серии позволило реализовать жёсткое и устойчивое крепление вращающегося вала катушки, обеспечив

надёжную и долговечную работу механизма при многократных циклах намотки и размотки кабеля.



Рисунок 10 – Подшипниковый узел UCFC 204

Для подключения внутритрубного модуля робота к внешнему кабелю связи и питания используется герметичный многоконтактный разъём серии WEIPU M20 модели TQ + ZG на 12 контактов, показанный на рисунке 11. Разъём обеспечивает надёжное электрическое соединение между внутренними компонентами устройства и внешним модулем катушки, по которому передаются сигналы управления, данные Ethernet и электропитание. Герметичный корпус выполнен из ударопрочного пластика и оснащён резьбовым кольцом фиксации, что гарантирует устойчивость к вибрациям, пыли и влаге, соответствуя требованиям эксплуатации в условиях загрязнённой трубной среды.

В конструкции разъёма реализована схема объединения (спаривания) отдельных пинов для увеличения пропускной способности по току: несколько контактов соединяются параллельно и используются для подачи питания (в частности, линии 24 В и 0 В), что позволяет безопасно пропускать

токи, необходимые для питания двигателей и нагревательных элементов. Оставшиеся пины задействованы для передачи сигнала Ethernet, что обеспечивается за счёт соблюдения требований к симметрии и экранированию витой пары в пределах разъёма.

Благодаря универсальной конструкции и компактным габаритам, WEIPU M20 TQ+ZG позволяет легко интегрировать разъём в корпус устройства, обеспечивая быстрый монтаж/демонтаж и минимальные электрические потери. Применение данного разъёма обеспечивает надёжность работы системы в условиях постоянной вибрации, влажности и загрязнений, характерных для роботизированной диагностики трубопроводов.



Рисунок 11 – Разъём WEIPU M20 TQ + ZG

2.1. Проектирование внутритрубного модуля устройства

В конструкции внутритрубного модуля робота используются направляющие стержни, представляющие собой отрезки труб из

нержавеющей стали марки AISI 304 с прецизионной внешней поверхностью. По этим направляющим трубкам перемещаются подвижные каретки, каждая из которых оснащена полимерными втулками скольжения, изготовленными из полиамида. Полиамидные втулки подобраны с минимальным зазором относительно направляющих, что обеспечивает плавное перемещение каретки без радиальных люфтов, вибраций и заклиниваний. Использование полимерных втулок позволяет исключить необходимость в регулярной смазке и повышает ресурс системы в условиях запылённой или агрессивной среды.

Трубки жестко соединены с основанием конструкции посредством лазерной сварки к пластинам, также выполненным из нержавеющей стали AISI 304. Стержни внутритрубного модуля показаны на рисунке 12. Плоские монтажные элементы изготовлены методом лазерной резки, что обеспечило точную геометрию, соосность отверстий и соответствие посадочным размерам. Каждая пластина имеет необходимые технологические отверстия под проводку электрокабелей и монтаж трапецевидного винта, обеспечивающего вертикальное позиционирование. Применение сварных соединений из коррозионностойкой стали и унифицированных крепёжных пластин позволяет повысить надёжность конструкции и облегчить её сборку и техническое обслуживание.



Рисунок 12 – Стержни внутритрубного модуля

Центральный сегмент ходового модуля представляет собой конструктивную сборку, выполненную из лазерно вырезанных металлических пластин толщиной 3 мм, предназначенную для объединения двух гусеничных половин робота и размещения компонентов управления и диагностики. Пластины изготовлены методом лазерной резки из нержавеющей стали, что обеспечивает высокую точность изготовления, устойчивость к коррозии и механическую прочность конструкции.

В конструкции центральной части предусмотрено множество монтажных отверстий диаметром М3, в том числе потайные отверстия в местах примыкания гусеничной ленты к корпусу. Это техническое решение позволяет предотвратить контакт шипов гусеницы с винтовыми головками и обеспечивает плавность хода. Центральная пластина также выполняет функцию несущего элемента для фиксации направляющих стержней из нержавеющей стали, по которым перемещаются каретки, образующие часть адаптивного механизма.

Через направляющие стержни проложены кабели, соединяющие боковые модули с центральным блоком. В центральном модуле размещаются

электронные компоненты, камера и соединительные разъёмы, через которые происходит коммутация с внешним модулем по интерфейсу Ethernet. Вся внутренняя разводка выполнена с использованием герметичных разъёмов типа AMP-M5-P5, обеспечивающих защиту от влаги и механических воздействий.

Сборка конструкции, показанная на рисунке 13, осуществляется методом соединения паз-шип, что позволяет позиционировать элементы с высокой точностью и формировать жёсткий и разборный каркас. На направляющие устанавливаются подвижные каретки и рычаги, формирующие кинематическую пару механизма адаптации под диаметр трубопровода. Гусеничные катки собираются отдельно, после чего на них натягивается гусеница, изготовленная из термополиуретана TPU с жёсткостью по Шору A95. Данный материал был выбран за счёт его высокой эластичности, износостойкости и совместимости с технологией FDM-печати. Изготовление гусениц производилось на 3D-принтере Creality K1.

Таким образом, конструкция центральной части ходового модуля обеспечивает жёсткое соединение всех элементов, надёжное размещение электроники и эффективную адаптацию к трубопроводам различного диаметра, сохраняя при этом модульность и удобство технического обслуживания.

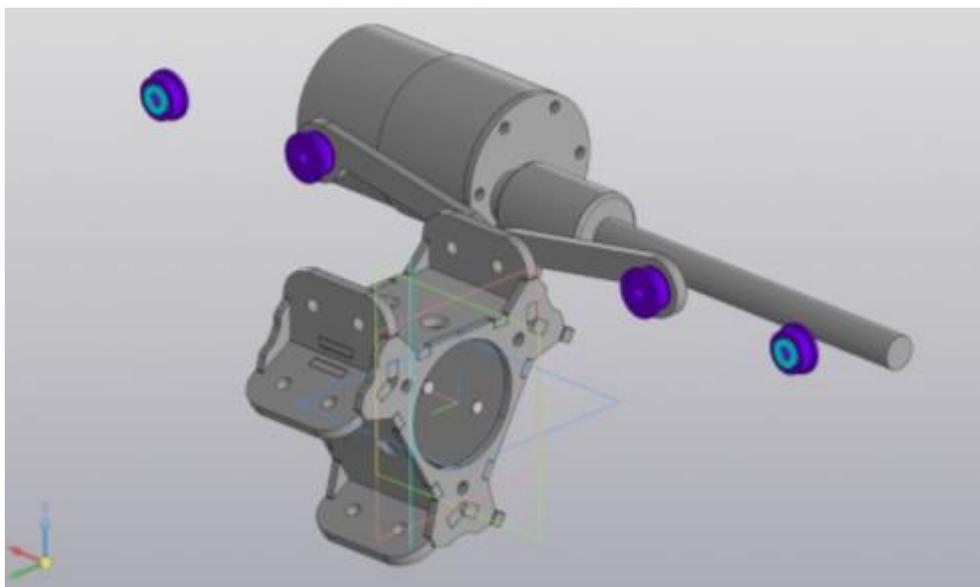


Рисунок 13 – Сборка основания внутритрубного модуля движения

Связь между модулями диагностического робота осуществляется с использованием гофрированного резинотехнического изделия, заимствованного из автомобильной промышленности. Подобные элементы традиционно применяются для защиты жгутов проводов, прокладываемых между дверями и кузовом транспортных средств.

Гофрированный элемент выполняет сразу несколько функциональных задач:

- обеспечивает механическую гибкость соединения, позволяя модулям свободно перемещаться друг относительно друга при прохождении поворотов и разветвлений трубопровода;
- выполняет роль демпфирующего звена, сглаживая динамические удары и вибрации, возникающие в процессе движения;
- служит защитной оболочкой для кабелей, проложенных между модулями — внутри гофры размещены сигнальные и силовые провода, соединяющие элементы электроники и приводы [15].

Выбор данного компонента обусловлен его высокими эксплуатационными характеристиками:

- стойкость к повышенным температурам и перепадам влажности;
- устойчивость к ультрафиолетовому излучению, что позволяет использовать изделие как в закрытых, так и в наружных участках трубопровода;
- высокая эластичность и прочность на разрыв, обеспечивающая длительный срок службы при постоянной деформации.

Кроме того, применение стандартного автомобильного компонента позволило снизить себестоимость конструкции и исключить необходимость разработки специализированного гибкого элемента. Фиксация гофры к модулям осуществляется через монтажные фланцы с герметизирующими прокладками, что препятствует попаданию пыли и влаги внутрь.

Таким образом, гофрированный соединительный элемент играет важную роль в обеспечении работоспособности всей модульной конструкции робота, объединяя механическую гибкость с защитой прокладываемых проводов и стойкостью к внешним воздействиям. Проектирование модуля движения показано на рисунке 14.

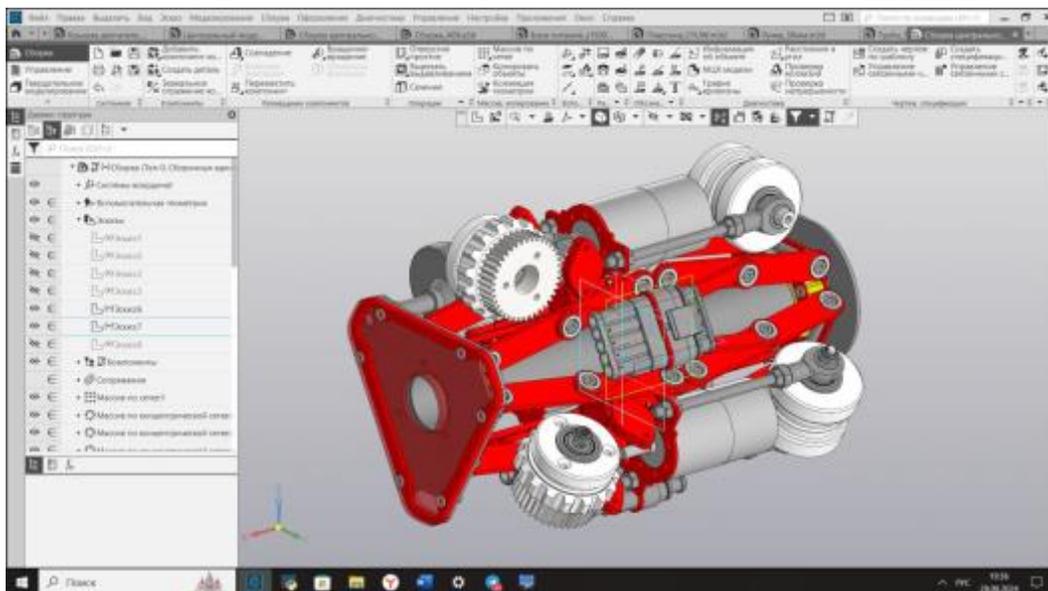


Рисунок 14 – Проектирование модуля движения

Для формирования профиля гусеницы использована модель зубчатого ремня T10 на 44 зуба, что позволило избежать необходимости расчёта собственного профиля передачи, а также обеспечить надёжное зацепление и равномерное натяжение при движении, показано на рисунках 15-17. Конфигурация гусеницы близка к круглой, что минимизирует биение и неравномерность натяжения в процессе эксплуатации. Натяжение гусеницы реализовано с помощью двух винтовых шпилек М5, позволяющих производить точную регулировку.

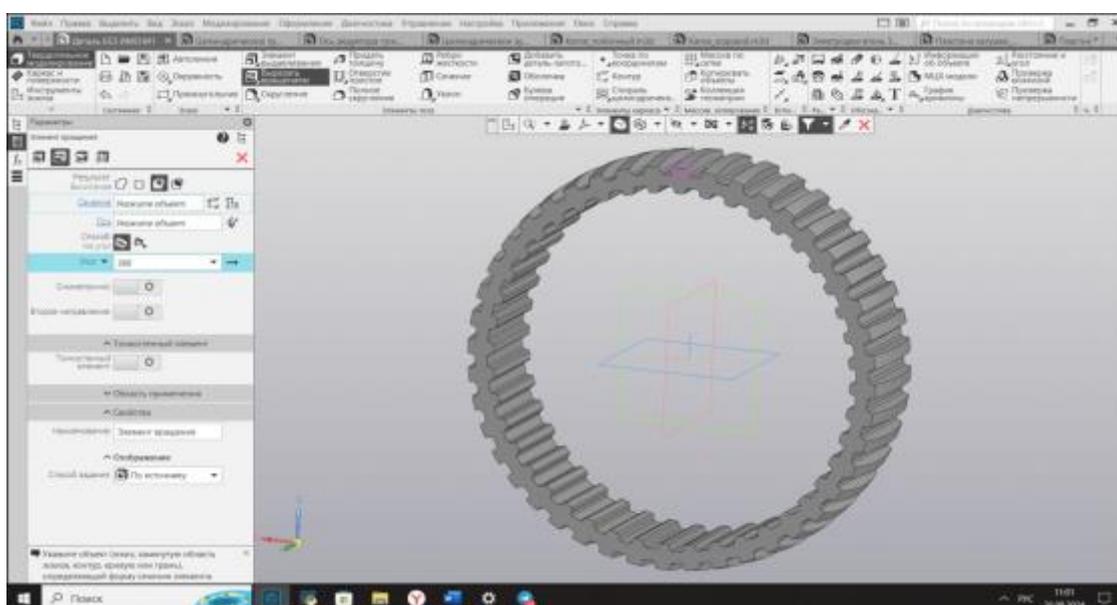


Рисунок 15 – Проектирование гусеницы



Рисунок 16 – Изготовление гусениц из термополиуретана А95



Рисунок 17 – Каретка модуля трапеции

Гусеничный модуль, показанный на рисунке 18, представляет собой приводной узел, закреплённый непосредственно на ходовом модуле робота и обеспечивающий его передвижение внутри трубопровода.



Рисунок 18 – Рама гусеничного блока

Основу конструкции составляет электродвигатель BLDC типа MY36GP-3626, расположенный по центру модуля. Данный двигатель оснащён встроенным редуктором с передаточным числом 1:36, что уже на этапе первичной передачи обеспечивает значительное увеличение крутящего момента. Устройство гусеничного катка показано на рисунке 19.

Для дополнительного понижения оборотов и повышения момента на исполнительном органе используется внешний редуктор, реализованный в виде угловой зубчатой передачи. Передача соединяет вал двигателя с приводным катком через промежуточную зубчатую пару. Наружное передаточное отношение составляет примерно 1:2, что в совокупности с редуктором двигателя даёт общий редукционный коэффициент порядка 1:72.

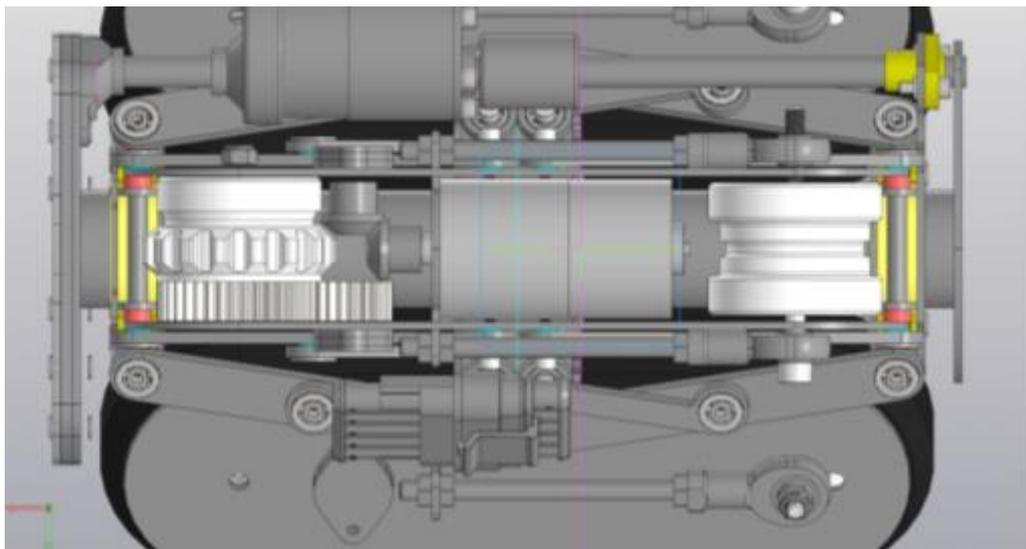


Рисунок 19 – Устройство гусеничного катка

Такое решение позволяет значительно увеличить тяговое усилие модуля, что критически важно при эксплуатации в трубопроводах с поворотами, изгибами и вертикальными участками. Особенно важна реализация высокого момента при движении вверх, когда робот вынужден преодолевать гравитационное сопротивление и одновременно компенсировать трение тянувшегося за ним кабеля, особенно в условиях сужений или заиленности труб [18].

Гусеничные катки изготовлены из пластика PETG, сочетающего жёсткость и износостойкость. Приводная шестерня катка выполнена из полиамида, который обеспечивает достаточную прочность при относительно малой массе. Использование пластиковых материалов обусловлено не только снижением массы и себестоимости, но и технологическими возможностями 3D-печати.

Изготовление компонентов гусеничного блока осуществлялось методом FDM-печати. При этом были учтены допуски на усадку и возможные искажения, возникающие при неравномерном охлаждении материала. Для уменьшения дефектов при печати использовались

термостабильные полимеры и подогреваемая платформа. FDM-печать показана на рисунке 20.



Рисунок 20 – FDM-печать

Конструкция модуля обеспечивает жёсткое крепление к основному шасси робота, передачу усилия к гусенице без проскальзывания, а также защищённость внутренних компонентов от загрязнения. Продуманное сочетание редукторов, лёгких материалов и компактной компоновки позволяет эффективно использовать модуль в ограниченном пространстве трубопровода.

Связь между модулями диагностического робота осуществляется с использованием гофрированного резинотехнического изделия, заимствованного из автомобильной промышленности. Подобные элементы традиционно применяются для защиты жгутов проводов, прокладываемых между дверями и кузовом транспортных средств.

Гофрированный элемент выполняет сразу несколько функциональных задач:

- обеспечивает механическую гибкость соединения, позволяя модулям свободно перемещаться друг относительно друга при прохождении поворотов и разветвлений трубопровода;
- выполняет роль демпфирующего звена, сглаживая динамические удары и вибрации, возникающие в процессе движения;
- служит защитной оболочкой для кабелей, проложенных между модулями — внутри гофры размещены сигнальные и силовые провода, соединяющие элементы электроники и приводы.

Выбор данного компонента обусловлен его высокими эксплуатационными характеристиками:

- стойкость к повышенным температурам и перепадам влажности;
- устойчивость к ультрафиолетовому излучению, что позволяет использовать изделие как в закрытых, так и в наружных участках трубопровода;
- высокая эластичность и прочность на разрыв, обеспечивающая длительный срок службы при постоянной деформации.

Кроме того, применение стандартного автомобильного компонента позволило снизить себестоимость конструкции и исключить необходимость разработки специализированного гибкого элемента. Фиксация гофры к модулям осуществляется через монтажные фланцы с герметизирующими прокладками, что препятствует попаданию пыли и влаги внутрь.

Таким образом, гофрированный соединительный элемент играет важную роль в обеспечении работоспособности всей модульной конструкции робота, объединяя механическую гибкость с защитой прокладываемых проводов и стойкостью к внешним воздействиям. Сборка внутритрубного модуля показана на рисунке 21.

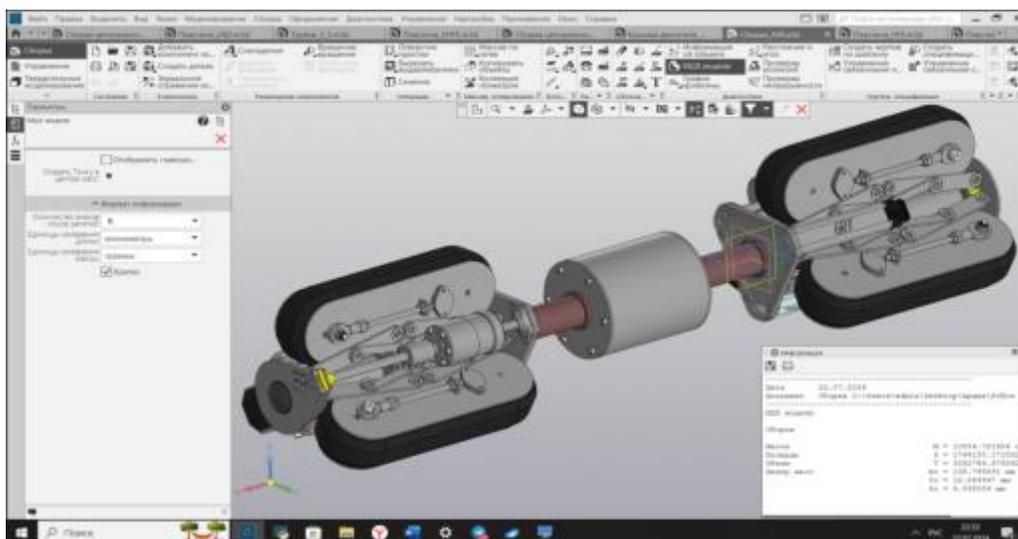


Рисунок 21 – Сборка внутритрубного модуля

2.2. Проектирование внешнего модуля устройства

Внешний блок управления, показанный на рисунке 22, представляет собой отдельный функциональный узел, размещённый на основании внешнего модуля робота. Его основная задача — обеспечение коммутации, ручного управления, подачи питания и подключения к операторскому интерфейсу. Конструкция блока выполнена с учётом требований к прочности, удобству монтажа и универсальности компоновки электронных компонентов.

Корпус блока был изготовлен методом трёхмерной печати (FDM) из термопластика с применением латунных термовставок, вплавляемых в пластик для надёжной фиксации крышки и крепления к монтажной плите. Внутренняя компоновка корпуса была спроектирована индивидуально, что позволило удобно разместить элементы управления, плату электроники и кабельные выводы. С тыльной стороны корпус закрывается металлической пластиной, обеспечивающей дополнительную механическую жёсткость и экранирование [20].

Блок управления включает в себя следующие элементы:

- кнопка аварийной остановки, обеспечивающая немедленное отключение питания и безопасную остановку системы;
- тумблеры ручного управления, позволяющие оператору вручную включать или отключать привод катушки;
- кнопка включения питания с фиксацией состояния;
- герметичный Ethernet-разъём, предназначенный для подключения внешнего компьютера пользователя, через который осуществляется видеопоток, мониторинг и управление [11].

Внутри корпуса размещены:

- плата управления на основе отладочной платы STM32G070RBT6;
- интерфейсный модуль USB-TCP232-T2, осуществляющий преобразование сигнала UART - Ethernet;
- сетевой коммутатор (например, ANDDEAR-5-8), объединяющий Ethernet-соединения с внутренним модулем;
- импульсный блок питания на 48 В, питающий как внешнюю часть робота, так и внутреннюю через силовой кабель с токосъёмными кольцами;
- понижающий стабилизатор напряжения, обеспечивающий локальное питание микроконтроллера, логики и других чувствительных цепей.

Выбор напряжения 48 В обусловлен необходимостью компенсации потерь при передаче энергии по кабелю длиной до 150 метров. Стабилизация на стороне потребителя (внутреннего модуля) позволяет обеспечить устойчивую работу электроники и двигателей при колебаниях нагрузки.



Рисунок 22 – Сборка внешнего блока управления

Внешний модуль диагностического комплекса представляет собой автономный наземный блок, обеспечивающий подачу питания, связь и механическую смотку кабеля, соединяющего внутренний модуль с операторским постом. Устройство смонтировано в металлическом корпусе и включает элементы управления, силовые узлы и механизмы размотки/смотки кабеля. Конструкция спроектирована с учётом условий эксплуатации в строительных и коммунальных объектах, где важны пыле- и влагозащита, удобство транспортировки и надёжность. Конструкция внешнего модуля устройства показана на рисунках 23-24.

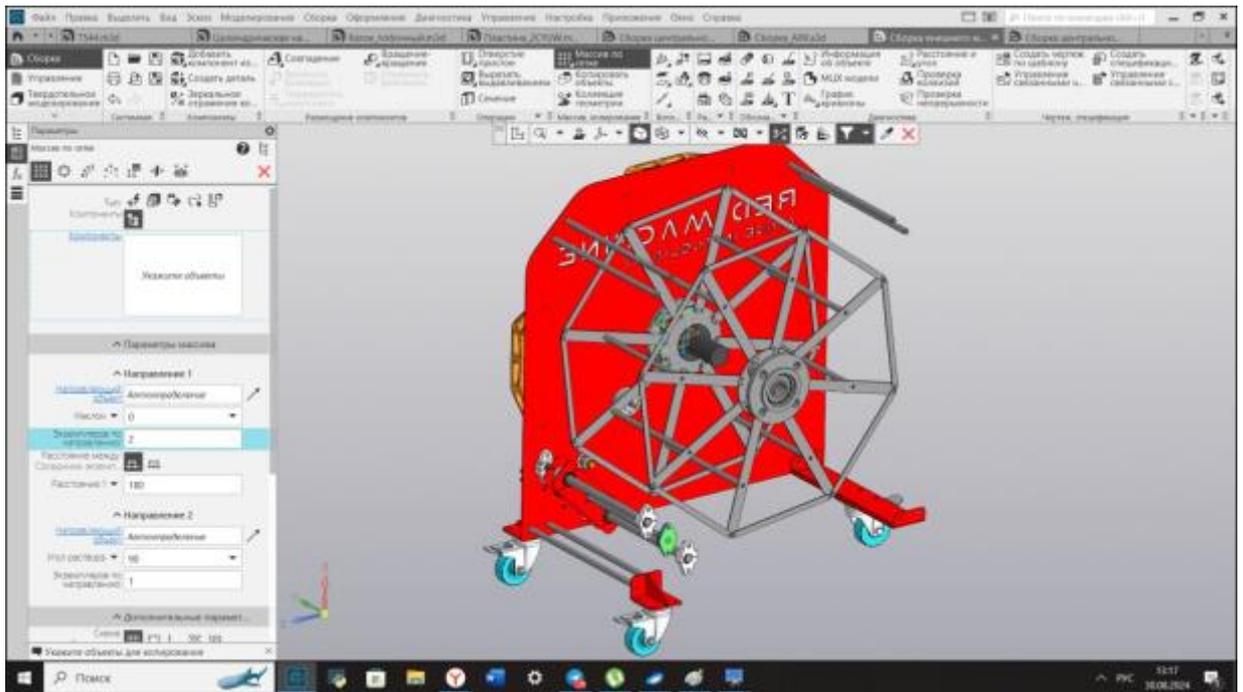


Рисунок 23 – Конструкция внешнего модуля устройства

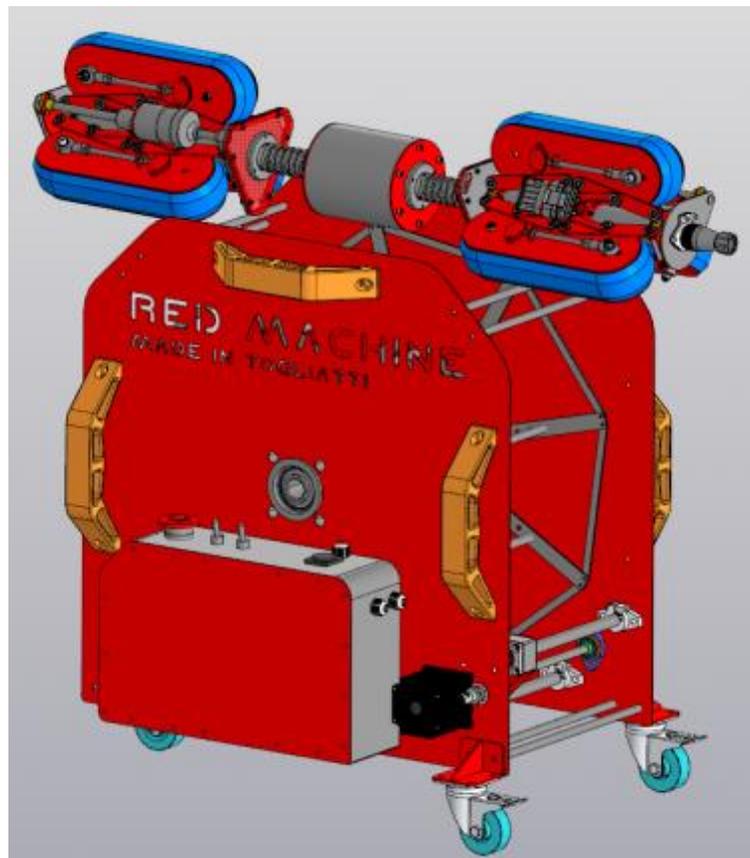


Рисунок 24 – Сборка внешнего модуля устройства

2.3. Разработка системы управления

В рамках разработки встроенного программного обеспечения для внутритрубного робота реализован модуль управления направлением движения, основанный на приёме команд через UART-интерфейс и коммутации цифровых выходов микроконтроллера STM32G070 [14].

Ключевая функция `receive_and_transmit()` обеспечивает приём однобайтовой управляющей команды по UART3 и соответствующее управление состоянием GPIO-выводов, отвечающих за направление вращения приводов.

Реализовано три управляющих команды:

'1' — движение вперёд: на все пины направления и включения подаётся высокий уровень;

'2' — движение назад: сигналы POS сбрасываются, пины REVERSE остаются активны

'0' — остановка: все пины REVERSE отключаются, моторы деактивируются.

Параллельно с этим реализована передача подтверждающего сообщения обратно через UART, что может быть использовано для обратной связи с управляющим терминалом или операторским интерфейсом.

Функция реализована с использованием библиотеки STM32 HAL, что позволяет обеспечить переносимость и адаптацию к другим моделям микроконтроллеров STM32. Применение асинхронной последовательной связи (UART) делает возможным удалённое управление роботом через проводной интерфейс.

Таким образом, программный модуль формирует основу для простой и надёжной системы управления движением, обеспечивая прямую связь между внешним управляющим устройством и исполнительными механизмами робота.

Исходный код функции управления внутритрубным модулем:

```
void receive_and_transmit()
```

```

{
    uint8_t received_byte;
    if (HAL_UART_Receive(&huart3, &received_byte, 1, HAL_MAX_DELAY)
    == HAL_OK) {
        if (received_byte == '1') {
            HAL_GPIO_WritePin(GPIOC, POS8_Pin|POS6_Pin, GPIO_PIN_SET);
            HAL_GPIO_WritePin(GPIOA, POS4_Pin|POS1_Pin, GPIO_PIN_SET);
            HAL_GPIO_WritePin(GPIOB, POS3_Pin|POS7_Pin|POS5_Pin|POS2_Pin,
GPIO_PIN_SET);
            HAL_GPIO_WritePin(GPIOA,
REVERSE4_Pin|REVERSE8_Pin|REVERSE6_Pin|REVERSE5_Pin|REVERSE1_
Pin, GPIO_PIN_SET);
            HAL_GPIO_WritePin(GPIOB,
REVERSE3_Pin|REVERSE7_Pin|REVERSE2_Pin, GPIO_PIN_SET);
            const char *str = "Move forward\r\n";
            HAL_UART_Transmit(&huart3, (uint8_t *)str, strlen(str), 100);
        } else if (received_byte == '2') {
            HAL_GPIO_WritePin(GPIOC, POS8_Pin|POS6_Pin, GPIO_PIN_RESET);
            HAL_GPIO_WritePin(GPIOA, POS4_Pin|POS1_Pin, GPIO_PIN_RESET);
            HAL_GPIO_WritePin(GPIOB, POS3_Pin|POS7_Pin|POS5_Pin|POS2_Pin,
GPIO_PIN_RESET);
            HAL_GPIO_WritePin(GPIOA,
REVERSE4_Pin|REVERSE8_Pin|REVERSE6_Pin|REVERSE5_Pin|REVERSE1_
Pin, GPIO_PIN_SET);
            HAL_GPIO_WritePin(GPIOB,
REVERSE3_Pin|REVERSE7_Pin|REVERSE2_Pin, GPIO_PIN_SET);
            const char *str = "Move backward\r\n";
            HAL_UART_Transmit(&huart3, (uint8_t *)str, strlen(str), 100);
        } else if (received_byte == '0') {

```

```

    HAL_GPIO_WritePin(GPIOA,
REVERSE4_Pin|REVERSE8_Pin|REVERSE6_Pin|REVERSE5_Pin|REVERSE1_
Pin, GPIO_PIN_RESET);
    HAL_GPIO_WritePin(GPIOB,
REVERSE3_Pin|REVERSE7_Pin|REVERSE2_Pin, GPIO_PIN_RESET);
    const char *str = "Stopping\r\n";
    HAL_UART_Transmit(&huart3, (uint8_t *)str, strlen(str), 100);
}
}
}

```

Вывод по разделу 2

В результате выполнения второго раздела были проанализированы технические требования к системе и проведён обоснованный подбор комплектующих, необходимых для реализации функциональных и конструкционных задач диагностического робота. Выбранные компоненты обеспечивают надёжную работу устройства в ограниченном пространстве трубопровода с переменной геометрией, а также позволяют передавать данные в реальном времени по Ethernet.

Разработана конструкция внутритрубного модуля, включающая три секции: два гусеничных блока с системой адаптации под диаметр трубы и центральный модуль с электроникой и камерой. Применение многорычажной кинематики и трапециевидных винтов позволило обеспечить надёжную фиксацию и движение внутри труб различного диаметра [5].

Спроектирован внешний модуль с системой кабельной подачи, рассчитанный на 150 метров кабеля. Он оснащён такими же приводами и управляющим узлом, как и внутренний модуль, что обеспечило унификацию и сократило затраты на производство [16].

3. Разработка печатных плат

Для предварительной проверки алгоритмов управления и согласования интерфейсов между компонентами системы была собрана отладочная схема на макетной плате, а также выполнена сборка функционального стенда с приводами, имитирующего работу гусеничных модулей робота. Для сборки отладочной платы разработана структурная схема устройства. Структурная схема изображена на рисунке 25.

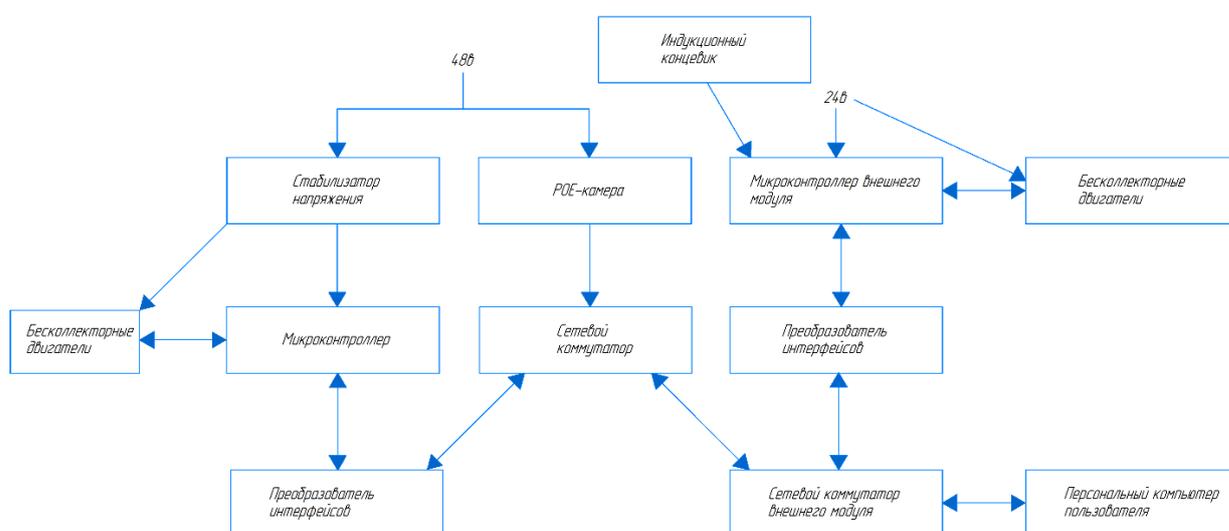


Рисунок 25 – Структурная схема

Первоначально программная отладка велась на макетной плате с использованием отладочной платы STM32G070RBT6, подключённой через интерфейс ST-Link. Сборка отладочной платы показана на рисунке 26.

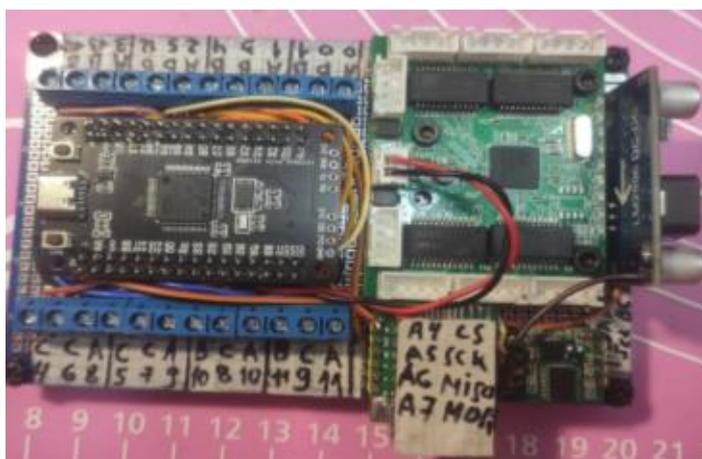


Рисунок 26 – Сборка отладочной платы

Сборка стенда, показанная на рисунке 27, позволила произвести отладку базовых управляющих функций, протестировать работу драйверов и при необходимости внести изменения до изготовления печатной платы [19].



Рисунок 27 – Сборка стенда для отладки платы

На рисунке изображена система управления восьмью бесщёточными двигателями постоянного тока (BLDC), обозначенными как M1–M8. Управление осуществляется микроконтроллером (обозначен A1), в роли

которого используется микроконтроллер серии STM32, подключённый ко всем исполнительным узлам.

Каждый двигатель подключён через специализированный встроенный драйвер, обеспечивающий питание, направление вращения (сигнал Reverse), управление скоростью (сигнал PWM), а также считывание сигнала скорости (FG — Frequency Generator, то есть выход тахометра/холл-сенсора). Все двигатели питаются от шины +24 В, подводимой индивидуально к каждому драйверу.

Цепи управления каждого двигателя подключены к соответствующим портам ввода/вывода микроконтроллера (PA, PB, PC, PD). Таким образом реализовано индивидуальное управление каждым двигателем и приём сигнала с тахометрического выхода, что позволяет построить систему обратной связи по скорости вращения [17].

На схеме также изображён модуль A2, предположительно являющийся UART-конвертером или модулем связи (например, USB-TCP232-T2), обеспечивающим передачу данных между микроконтроллером и внешней системой управления. Он питается от источника 5 В и 3.3 В.

Силовая часть схемы представлена отдельными подводами питания 24 В к каждому из драйверов, что обеспечивает равномерное распределение нагрузки и устойчивость работы системы в условиях электромагнитных помех. Управляющая логика питается от 5 В.

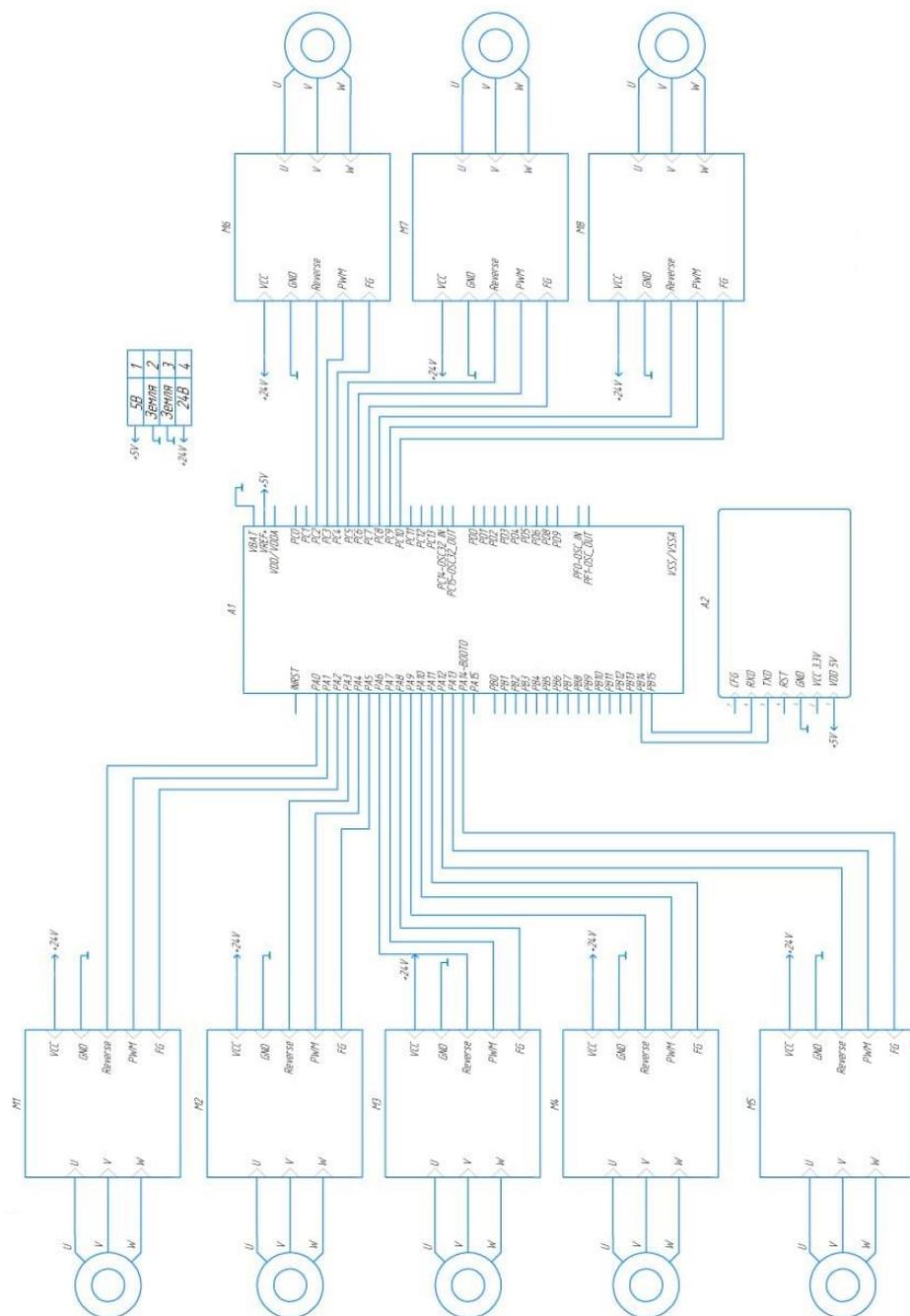


Рисунок 28 – Принципиальная электрическая схема

Для обеспечения стабильного питания электронных компонентов работа — таких как микроконтроллеры, модули управления и интерфейсные преобразователи — в составе конструкции используются два линейных стабилизатора напряжения, размещённые соответственно во внутреннем и внешнем модулях устройства. Изготовленные стабилизаторы напряжения показаны на рисунке 29.

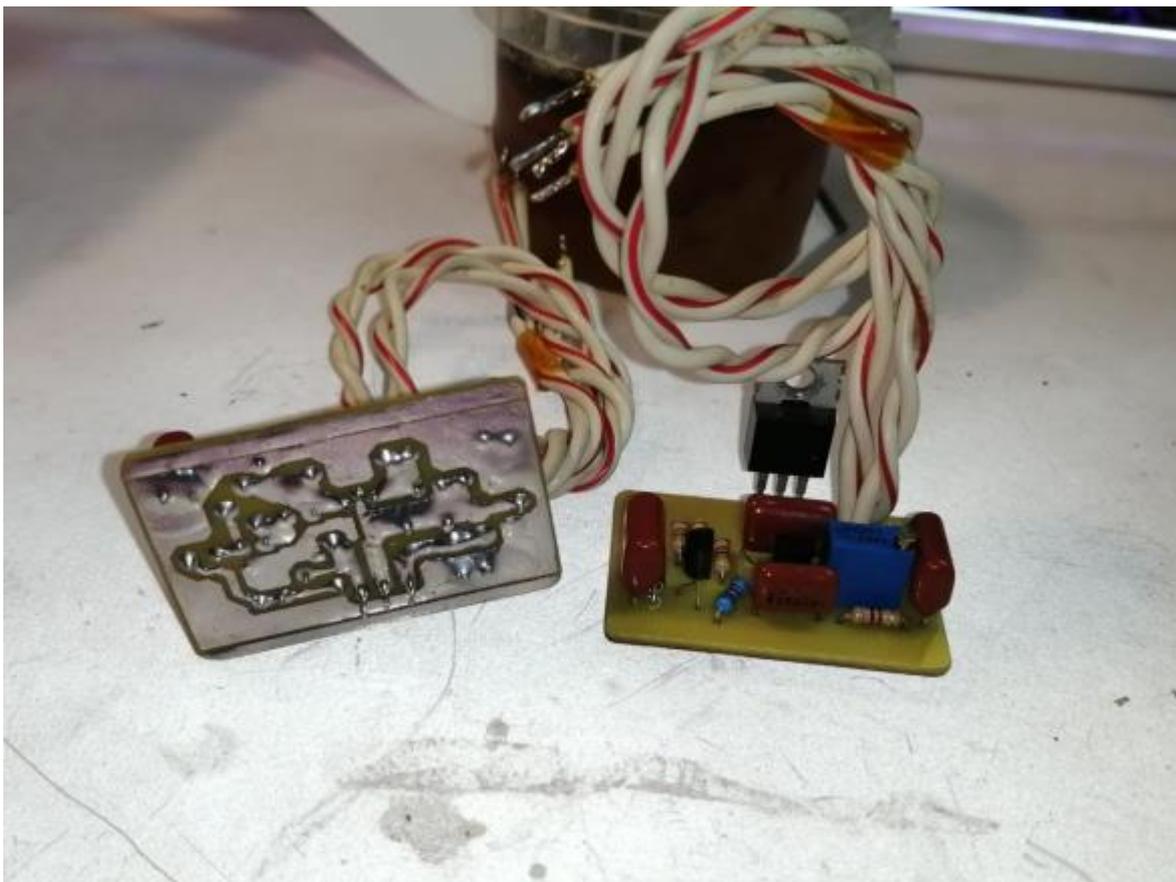


Рисунок 29 – Изготовленные стабилизаторы напряжения

Оба стабилизатора были разработаны и изготовлены автором в соответствии с методическими рекомендациями Нечаева («Модуль мощного стабилизатора напряжения на полевом транзисторе», г. Курск). Схема стабилизатора предусматривает использование полевого транзистора в ключевом режиме совместно с элементами обратной связи по напряжению, что позволяет поддерживать постоянное выходное напряжение при колебаниях входного в пределах от 12 до 48 В. Такое решение особенно актуально в условиях нестабильной нагрузки и длинных линий передачи питания (до 150 м в данном проекте).

Проектирование печатной платы стабилизатора было выполнено в среде Sprint Layout, с учётом требований к компоновке элементов, минимизации шумов и теплового отвода. В дальнейшем плата была

реализована методом лазерно-утюжной технологии (ЛУТ), включающей печать шаблона, перенос на текстолит, травление, сверление, монтаж и последующую проверку.

Особенности применения:

Во внешнем модуле стабилизатор получает входное питание 48 В от промышленного источника и формирует стабильное напряжение питания 12 В для локальных электронных компонентов — таких как плата STM32, Ethernet-модуль и интерфейсные устройства.

Во внутреннем модуле стабилизатор используется для питания камеры, микроконтроллера и управляющей части драйверов BLDC, также обеспечивая 12 В с понижением от входных 48 В.

Использование отдельных стабилизаторов в каждом модуле позволило:

- минимизировать потери на линиях передачи;
- изолировать цепи питания чувствительной электроники от помех, генерируемых силовыми элементами;
- обеспечить устойчивую работу системы даже при падении напряжения вследствие сопротивления кабеля и переходных контактов.

Кроме того, применение ЛУТ-технологии позволило оперативно внести корректировки в компоновку и провести отладку без необходимости промышленного изготовления плат, что соответствует критерию быстрого прототипирования в рамках учебно-научного проекта.

Для разработки печатных плат в рамках данного проекта была выбрана программная среда Sprint Layout, представляющая собой специализированный САПР для ручного трассирования одно- и двухслойных печатных плат. В проекте использовались однослойные печатные платы, что позволило упростить топологию, сократить количество переходных отверстий и упростить последующую реализацию платы методом ЛУТ (лазерно-утюжной технологии).

Sprint Layout предоставляет пользователю минималистичный и интуитивно понятный интерфейс, идеально подходящий для разработки

простых и среднесложных печатных плат без необходимости в создании схем в отдельных редакторах. Это делает программу особенно удобной на этапе прототипирования, когда важны скорость, гибкость и возможность быстрой коррекции маршрутов [10].

Преимущества использования Sprint Layout:

- простота освоения: не требует длительного обучения и подходит даже для начинающих разработчиков;
- гибкое ручное размещение компонентов и дорожек, позволяющее оптимизировать трассировку с учётом специфики конструкции корпуса;
- поддержка авторазводки и авторазмещения — при необходимости;
- наличие встроенной библиотеки посадочных мест (футпринтов) для распространённых компонентов;
- мгновенное отображение слоёв, зазоров, дорожек, антипадов и других топологических элементов.

Принципиальная схема стабилизатора напряжения показана на рисунке 30.

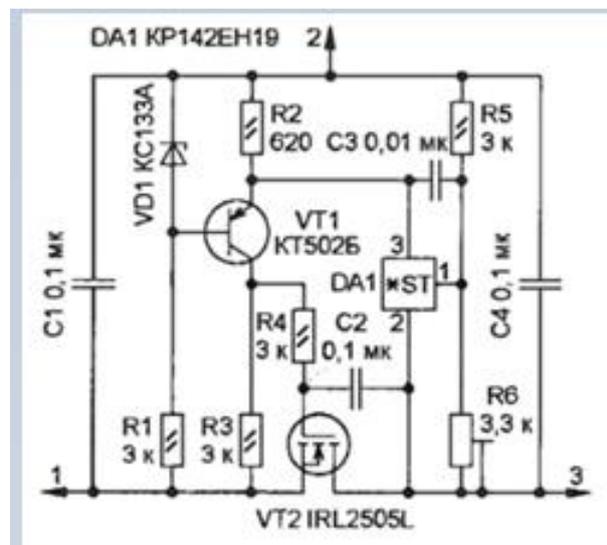


Рисунок 30 – Принципиальная схема стабилизатора напряжения

Возможность экспорта в форматы для фоторезистов и печати шаблона для ЛУТ-технологии.

Процесс проектирования платы включал следующие этапы:

Разработка топологии вручную: с учётом минимальной ширины дорожек, допустимых зазоров и плотности размещения элементов.

Оптимизация трассировки: все сигнальные линии и цепи питания размещены с учётом минимизации пересечений и наводок.

Добавление монтажных отверстий и контактных площадок: особенно важно при ручной пайке и необходимости многократного монтажа.

Проверка проекта: визуальный контроль замыканий, расстояний между цепями, симметрии расположения элементов.

Экспорт шаблона: печать шаблона платы на лазерном принтере на глянцевой бумаге для последующего переноса методом ЛУТ. Печать платы и готовая плата показаны на рисунках 31-32 соответственно.

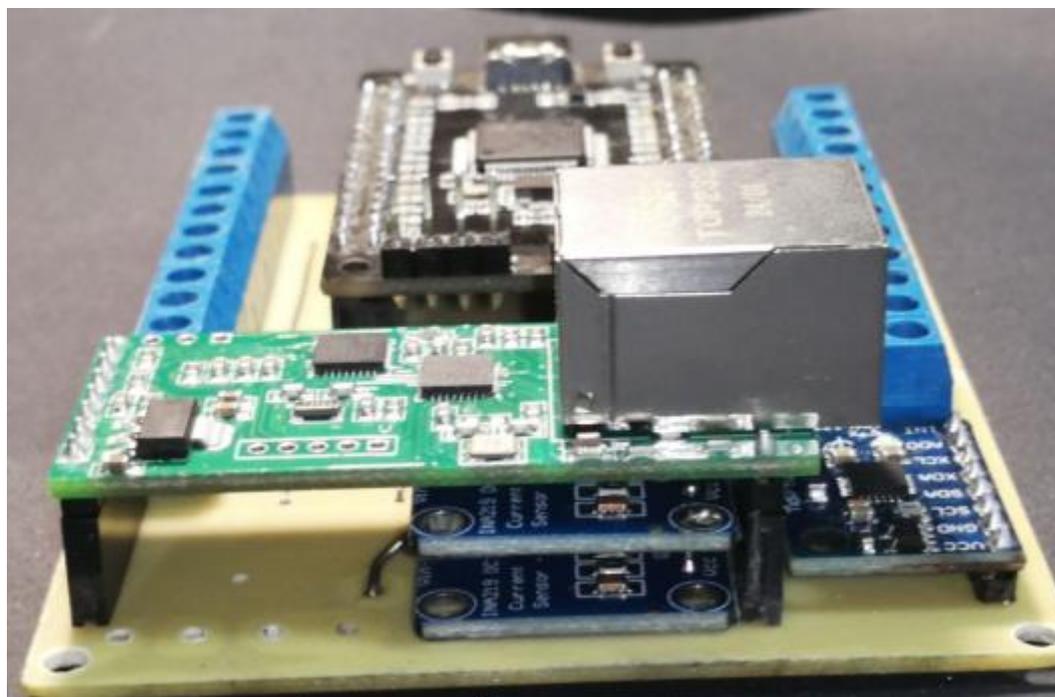


Рисунок 31 – Изготовленная плата

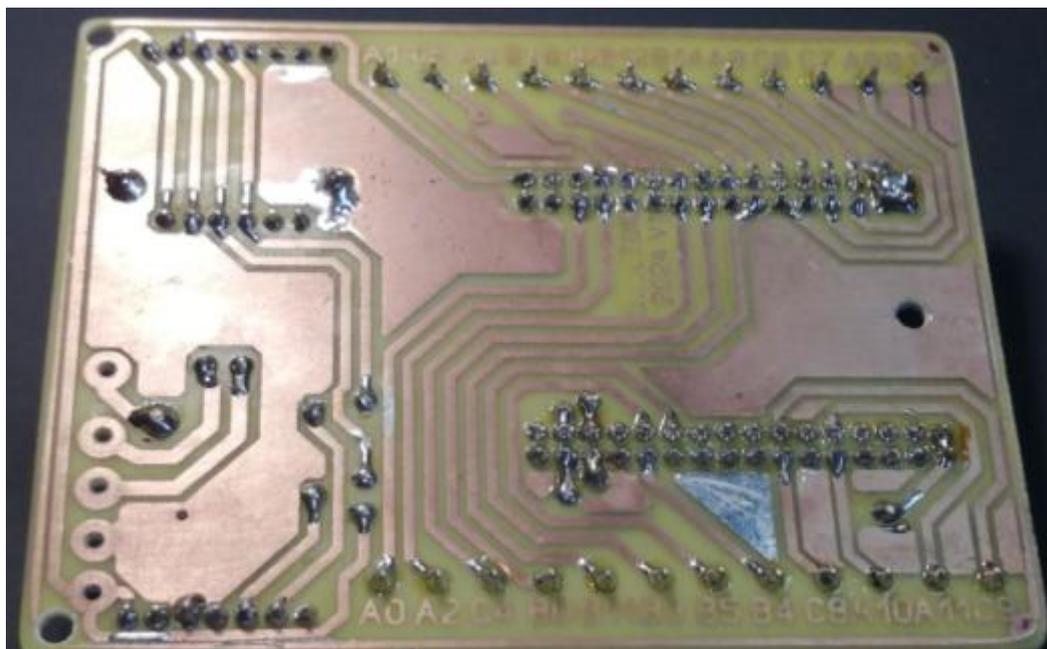


Рисунок 32 – Дорожки печатной платы

Для ускорения разработки и повышения модульности схемотехники в проекте были использованы шилды (платы расширения), показанные на рисунке 33, представляющие собой промежуточные печатные платы с разводкой стандартных интерфейсов и удобными разъёмами для подключения внешних компонентов. Это решение позволило упростить разводку основной платы, обеспечить надёжную коммутацию и повысить ремонтопригодность системы.

1. Шилд с микроконтроллером STM32G070RBT6

Основным вычислительным элементом как во внутреннем, так и во внешнем модуле является отладочная плата на базе STM32G070RBT6. Для её интеграции в общую систему был разработан индивидуальный шилд, содержащий:

- посадочное место под отладочную плату (с разъёмами PLS/IDC);
- линию питания 24 В и стабилизатор для микроконтроллера;
- буферные каскады, если требовалось согласование уровней;

- площадки для подключения внешних компонентов (датчики Холла, кнопки, реле, UART-интерфейс);
- выходы на управляющие сигналы BLDC-приводов: направление, ШИМ, авария, разрешение.

Шилд выполнен в виде компактной однослойной печатной платы, спроектированной в Sprint Layout и изготовленной методом ЛУТ. Его использование позволило избежать большого количества навесного монтажа и исключить ошибки при соединении множества сигнальных линий вручную [10].

2. Шилд для Ethernet-модуля USB-TCP232-T2

Для реализации связи между модулями и компьютером оператора в проекте применён UART - Ethernet преобразователь USB-TCP232-T2. Для его подключения был разработан отдельный шилд, содержащий:

- разъём подключения модуля;
- линию питания 3.3 В и конденсаторы развязки;
- разводку сигнальных цепей TX, RX к STM32;
- экранированный Ethernet-разъём на панель корпуса (или провод).

Наличие унифицированного шилда позволило использовать одну и ту же разводку как во внутреннем, так и во внешнем модуле робота, тем самым снизив стоимость и упростив изготовление.

Преимущества использования шилдов в проекте:

- модульность: каждый блок можно заменять или модернизировать независимо;
- повторяемость: один и тот же шилд используется в разных модулях;
- унификация: упрощён склад и сборка;
- возможность быстрого монтажа и отладки;
- повышенная надёжность соединений и уменьшение количества навесного монтажа.

Таким образом, использование шилдов стало эффективным решением при создании прототипа диагностического робота, позволив ускорить процесс сборки и повысить удобство последующего технического обслуживания.

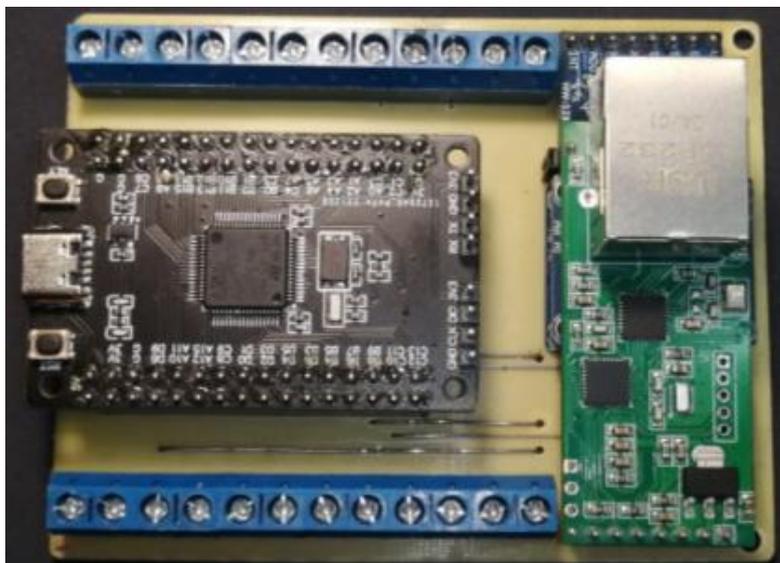


Рисунок 33 – Вид сверху изготовленного модуля

Вывод по разделу 3

В рамках третьего раздела была разработана и реализована печатная плата, выполняющая функции управляющего узла диагностического робота. Плата спроектирована с учётом требований компактности, удобства монтажа и устойчивости к внешним воздействиям, характерным для условий эксплуатации внутри трубопроводов. На плате размещены отладочная плата STM32G070RBT6, модуль интерфейсного преобразователя USB-TCP232-T2, а также винтовые клеммники для подключения исполнительных механизмов и датчиков.

Была обеспечена унификация конструкции: одна и та же плата применяется как во внутреннем, так и во внешнем модулях устройства, что позволило снизить себестоимость серийного изготовления, упростить логистику и повысить надёжность системы за счёт повторяемости технических решений.

Заключение

В ходе выполнения выпускной квалификационной работы была разработана роботизированная система для видеодиагностики трубопроводов с диаметром 200–400 мм, предназначенная для работы в условиях сложной или неизвестной топологии труб. Актуальность задачи обусловлена необходимостью своевременного технического контроля состояния теплосетей, изношенность которых может привести к серьёзным авариям и экономическим потерям.

Анализ существующих решений показал, что большинство промышленных диагностических роботов либо рассчитаны на трубопроводы большого диаметра, либо не обладают достаточной проходимостью, адаптивностью и стабильной связью в металлической среде. В связи с этим разработанная система ориентирована на устранение указанных недостатков путём применения модульной архитектуры, проводной связи по Ethernet и механизма адаптации под диаметр трубы с помощью трапециевидного винта и многорычажной системы.

Разработанный робот состоит из трёх соединённых модулей, обеспечивающих движение, адаптацию и связь. Внутренняя камера передаёт видеопоток в реальном времени на внешний компьютер, где осуществляется его обработка и запись. Использование кабельной катушки длиной до 150 метров позволяет отказаться от автономного питания и повысить надёжность работы системы в условиях городской подземной инфраструктуры.

Реализована управляющая система на базе микроконтроллера STM32, создана печатная плата, разработано программное обеспечение, обеспечивающее управление приводами.

Список используемой литературы

1. Алексеев, А.В. Основы робототехники: учебное пособие / А.В. Алексеев. — М.: Машиностроение, 2020. — 345 с.
2. Беспалов, А.Н. Проектирование мехатронных систем: монография / А.Н. Беспалов, В.И. Долженков. — СПб.: Политехника, 2019. — 267 с.
3. ГОСТ Р 58090-2018. Роботы и робототехнические устройства. Термины и определения. — М.: Стандартиформ, 2019. — 24 с.
4. Дуденко, С. Ф. Трубопроводные роботы для внутритрубной диагностики и ремонта / С. Ф. Дуденко, А. В. Лебедев. — Москва: Машиностроение, 2020. — 286 с.
5. Зенкевич, С.Л. Основы управления манипуляционными роботами: учебник / С.Л. Зенкевич, А.В. Назарова, Е.Ю. Шамраева. — М.: Изд-во МГТУ им. Баумана, 2018. — 480 с.
6. Козырев, Ю.Г. Микроконтроллеры STM32: учебное пособие / Ю.Г. Козырев. — М.: ДМК Пресс, 2021. — 384 с.
7. Корендясев, А.И. Теоретические основы робототехники: монография / А.И. Корендясев, Б.Л. Саламандра, Л.И. Тывес. — М.: Наука, 2020. — 432 с.
8. Кудрявцев, В.А. Механика промышленных роботов: учебное пособие / В.А. Кудрявцев. — СПб.: Политехника, 2019. — 312 с.
9. Лапин, А.В. Современные методы технической диагностики: монография / А.В. Лапин. — М.: Техносфера, 2021. — 276 с.
10. Прядилов, А.В. Промышленная электроника: учебник / А.В. Прядилов. — Тольятти: ТГУ, 2019. — 412 с.
11. Усатова, И.Ю. Методы технической диагностики: учебное пособие / И.Ю. Усатова. — Тольятти: ТГУ, 2020. — 186 с.
12. Тимофеев, А.В. Электронные средства контроля и диагностики: учебник / А.В. Тимофеев. — М.: Высшая школа, 2020. — 384 с.

13. Челпанов, И.Б. Основы робототехники: учебное пособие / И.Б. Челпанов. — М.: Высшая школа, 2021. — 352 с.
14. Bogue, R. Recent developments in robotics for the oil and gas industry / R. Bogue // *Industrial Robot: An International Journal*. — 2019. — Vol. 46, № 5. — P. 521-527.
15. Dombre, E. Robotics in smart manufacturing / E. Dombre, P. Neto // *Springer Handbook of Robotics*. — 2020. — P. 1657-1678.
16. Siciliano, B. Robotics: Modelling, Planning and Control / B. Siciliano, L. Sciavicco, L. Villani, G. Oriolo. — London: Springer-Verlag, 2019. — 632 p.
17. Murphy, R.R. Introduction to AI Robotics / R.R. Murphy. — Cambridge: MIT Press, 2020. — 456 p.
18. Siegwart, R. Introduction to Autonomous Mobile Robots / R. Siegwart, I.R. Nourbakhsh, D. Scaramuzza. — Cambridge: MIT Press, 2019. — 472 p.
19. Craig, J.J. Introduction to Robotics: Mechanics and Control / J.J. Craig. — Pearson, 2020. — 408 p.
20. Yoshida, K. Fundamentals of Robotics Engineering / K. Yoshida. — Tokyo: Springer Japan, 2019. — 314 p.