

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 экструдера для получения филамента для 3д-принтера

Обучающийся

А. Н. Пименов

(Инициалы Фамилия)

(личная подпись)

Руководитель

к.т.н., доцент, М. В. Позднов

(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 выпускной квалификационной работы: «Разработка экструдера для получения филамента для 3д-принтера».

Выпускная квалификационная работа состоит из введения, трёх глав, 37 рисунков, 7 таблиц, заключения, списка используемой литературы из 23 источников, включая иностранные, и трёх приложений.

Целью данной ВКР является разработка линии экструзии филамента для 3D-печати, способной перерабатывать как стандартные, так и композитные материалы.

Объектом выпускной квалификационной работы является лабораторная экструзионная установка для получения полимерной нити.

Предметом выпускной квалификационной работы является проектирование и реализация модульной экструзионной системы с автоматизированным контролем температуры и протяжки.

Ключевыми задачами являются: подбор комплектующих, проектирование механических и электронных модулей, изготовление узлов, а также разработка управляющего программного обеспечения на базе микроконтроллера ESP32-S3.

Работа разделена на логически связанные разделы: аналитический обзор, механическое и электронное проектирование, программирование логики управления и экспериментальные испытания экструзии филамента.

Первая часть содержит обзор существующих настольных экструдеров (MK1, Wellzoom), их достоинств и ограничений, а также формулирует концепцию разрабатываемой установки.

Вторая часть описывает конструктивное проектирование основных узлов: шнековой пары, модулей протяжки и намотки, управляющей электроники и температурных систем.

Третья часть посвящена разработке управляющей программы в среде Arduino IDE, реализации ПИД-регулирования и визуализации параметров через интерфейс GyverHub.

В заключение следует отметить, что разработанная система экструзии обеспечивает получение филамента диаметром $1,75 \pm 0,05$ мм из PETG, ABS и композитных материалов с потенциалом масштабирования до промышленного уровня.

Abstract

The title of the graduation work is "Development of an Extruder for Producing Filament for 3D Printers."

The graduation work consists of an introduction, three chapters, 37 figures, 7 tables, a conclusion, 23 references, including foreign sources, and 3 appendices.

The aim of this graduation work is to develop a filament extrusion line for 3D printing, capable of processing both standard and composite materials.

The object of the graduation work is a laboratory extrusion line for producing polymer filament.

The subject of the graduation work is the design and implementation of a modular extrusion system with automated thermal and traction control.

The key tasks include selecting components, designing mechanical and electronic modules, manufacturing assemblies, and developing control software based on the ESP32-S3 microcontroller.

The work is divided into logically connected sections: analytical review, mechanical and electronic design, programming of control logic, and experimental testing of filament extrusion.

The first part includes an overview of existing desktop extruders (MK1, Wellzoom), their advantages and limitations, and defines the design concept of the author's installation.

The second part presents the structural design of the main nodes: screw pair, traction and winding modules, control electronics, and thermal systems.

The third part focuses on the development of the control program in the Arduino IDE, implementation of PID-regulation, and visualization of parameters via the GyverHub interface.

In conclusion, the developed extrusion system ensures the production of filament with a diameter of 1.75 ± 0.05 mm from PETG, ABS, and composite materials, with the potential for industrial upscaling.

Содержание

Введение.....	6
1. Постановка задачи	7
1.1. Формулирование цели и задач проекта	7
1.2. Анализ исходных данных и существующих решений.....	8
2. Проектирование устройства.....	12
3. Программирование устройства	46
4. Технологическая часть	56
Заключение	60
Список используемой литературы	61
Приложение А. Структурная схема	65
Приложение Б. Принципиальная электрическая схема	66

Введение

В последние годы технологии аддитивного производства (3D-печати) стремительно развиваются и внедряются как в промышленное производство, так и в потребительский сегмент. Одним из ключевых элементов в технологии FDM-печати является филамент — полимерная нить, подаваемая в печатающую головку. Качество филамента напрямую влияет на надежность, точность и долговечность получаемых изделий.

Коммерчески доступные катушки филамента зачастую стоят дорого, особенно если речь идет о специализированных или композитных материалах таких как PET-CF или ABS-CF. В условиях ограниченного бюджета или при необходимости самостоятельной настройки материала под задачу возникает необходимость в изготовлении филамента самостоятельно. Также возникает в потребность изготовления экструзионной линии при изготовлении и реализации деталей, напечатанных на 3Д-принтере, чтобы снизить стоимость итоговых изделий. Для этого требуется экструзионная установка, позволяющая перерабатывать гранулированное сырье в нить заданного диаметра.

В рамках выпускной квалификационной работы разработана экструзионная линия для изготовления филамента, отвечающего запросам потребителей. Данная разработка позволяет реализовать полученный опыт для постройки промышленной линии для изготовления филамента с производительностью 40-50 кг в час, изготавливать композитные полимеры: углеродонаполненные, с частицами наносеребра для изготовления электропроводящих материалов.

1 Постановка задачи

1.1 Формулирование цели и задач проекта

Актуальность данной работы обусловлена необходимостью создания доступного и функционального оборудования для локального производства филамента, используемого в технологиях трёхмерной печати методом послойного наплавления. Коммерческие образцы полимерной нити часто обладают высокой стоимостью и ограниченной доступностью, особенно при работе с композитными материалами (углеродонаполненные пластики, армированные смеси и др.).

Разработка компактной лабораторной экструзионной линии, обладающей модульной конструкцией, системой температурного контроля, управлением через микроконтроллер и возможностью автоматической корректировки параметров представляет собой актуальную задачу в контексте внедрения аддитивных технологий в образовательную и исследовательскую практику.

Цель работы заключается в разработке экструзионной установки для получения полимерной нити диаметром $1,75 \pm 0,05$ мм, предназначенной для последующего использования в 3D-принтерах, с возможностью обработки как стандартных, так и композитных материалов (PETG, ABS, PLA, PET-CF и др.).

Для достижения поставленной цели в рамках проекта решены следующие задачи:

- проведение анализа исходных данных и существующих решений в области лабораторных экструдеров [8];
- подбор необходимых комплектующих с учётом доступности, ремонтпригодности и технологических требований;

- проектирование и разработка механических узлов установки (включая шнековую пару, модуль охлаждения, систему протяжки и намотки);
- изготовление, сборка и тестирование основных узлов экструдера;
- разработка электронного блока управления на базе микроконтроллера ESP32;
- построение электрической принципиальной схемы системы управления;
- программирование микроконтроллера, включая реализацию PID-регулирования температур, управления шаговыми двигателями и визуализации параметров через пользовательский интерфейс.

Реализация проекта направлена на достижение высокоточной, повторяемой и стабильной экструзии филамента, что является основополагающим фактором для дальнейшего применения полученной нити в 3D-печати.

1.2 Анализ исходных данных и существующих решений

Экструдер MK1 by ARTME 3D, представленный на рисунке 1, представляет собой конструкцию с вертикально установленной шнековой парой [1]. Пруток охлаждается при помощи воздушного потока, создаваемый компьютерным кулером. Для вытягивания полученной нити используется боуден-экструдер от 3д-принтера. В конструкции используются шаговые двигатели, приводы подключены к материнской плате MKS, на которой располагаются драйвера A4988 [2]. Каркасом конструкции служит конструкционный профиль, пластиковые детали устройства изготовленные на 3д-принтер [5].

Данное устройство обладает высокой гибкостью, удобством в использовании и дешевизной за счет использования готовых решений, однако обладает рядом технических недостатков:

- низкая производительность;
- обладает 1 зоной нагрева шнековой пары, из-за чего сырье нагревается неравномерно;
- конструкция не имеет сенсора для измерения диаметра полученной нити;
 - конструкция не позволяет произвести модернизацию, ограничена жесткость рамы, производительность шнековой пары, реализовано на электронных компонентах 3д-принтера.

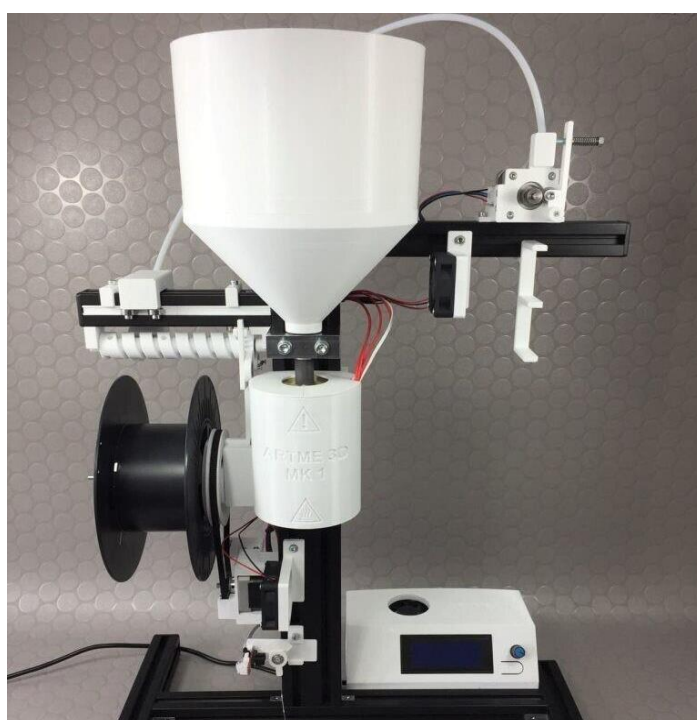


Рисунок 1 – Экструдер MK1 by ARTME 3D

Экструзионная линия Wellzoom состоит из 3-ех блоков: экструзии полимера, жидкостного охлаждения с последующим измерением, намотки филамента, и подробно рассмотрен в аналитическом обзоре [2]. Шнековая пара имеет 2 зоны нагрева, управление нагревательными элементами происходит при помощи PID регулятора REX-C100 [10]. Жидкостное охлаждение реализуется за счет 2 сосудов, наполненных водой, для плавного отпуска полимера до затвердивания. Измерение нити производится

индикатором часового типа. Для модуля вытягивания филамента используется коллекторный двигатель с ШИМ-регулятором, аналогично реализовано управление шнеком. Модуль намотки содержит привод для вращения катушки, укладчик филамента.

К плюсам устройства можно отнести низкую стоимость, гибкость за счет отсутствия электронной, программной зависимости блоков друг от друга, простоту использования [12, 13, 18].

Экструдер Wellzoom, показанный на рисунке 2, необходимо применять для экструзии полимеров в лабораторных условиях, когда запуск промышленной линии экономически нецелесообразен. Устройство обладает техническими ограничениями, которые ставят под вопрос рациональность модернизации узлов.



Рисунок 2 – Экструдер Wellzoom

Вывод по разделу 1

В первом разделе проведен анализ существующих решений в области малогабаритных экструзионных установок, предназначенных для

производства филамента. Рассмотрены конструкции экструдеров Triangle Lab и Wellzoom, выявлены их ключевые преимущества и недостатки.

Устройство Triangle Lab отличается простотой конструкции и доступностью комплектующих, однако не обеспечивает стабильного нагрева и не обеспечивает обратной связи по диаметру нити. Экструдер Wellzoom имеет более совершенную архитектуру, модуль охлаждения и измерения, но ограничен в возможностях модернизации и не имеет централизованной системы управления.

На основе анализа аналогов и оценки исходных данных сформирована концепция разработки собственной экструзионной линии. Проект предполагает использование доступных комплектующих, модульную конструкцию и интегрированную систему управления с возможностью контроля параметров и корректировки режимов работы.

Результаты анализа подтвердили актуальность выбранной темы, обозначили технические требования к разрабатываемому устройству и легли в основу проектной части диссертации. Разработана структурная схема (приложение А, рисунок А.1)

2 Проектирование устройства

При подборе шнековой пары для изготовления филамента важно обратить на параметры шнека [7]. Шнек должен обладать постоянным шагом и плавно переменной толщиной, на рисунке 3 изображены примеры готовых изделий [4]. При проектировании шнековых пар отталкиваются от соотношения L/D , отношение длины шнека к его диаметру, диапазон значений варьируется от 20 до 40 единиц. Для предотвращения проскальзывания шнека на хвостовике выполняется паз под шпонку. Диаметр и длина шнека сказываются на производительности экструзионной машины.



Рисунок 3 – Шнек экструдера

Шаговые двигатели Leadshine обеспечивают прецизионное движение, обеспечивая высокий крутящий момент. Шаговые двигатели, показанные на рисунке 4, разработанные для точного позиционирования движением в системах автоматизации, оптимизируют работу и продлевают срок службы оборудования в промышленных условиях. Благодаря прочной конструкции

шаговые двигатели эффективно минимизируют вибрацию и шум, защищая чувствительные системы без ущерба для производительности. Идеально подходящие для станков с ЧПУ, робототехники и 3D-принтеров, эти двигатели обеспечивают стабильно высокую производительность при различных условиях нагрузки, повышая общую производительность и эффективность. Шаговые двигатели позволяют отказаться от использования сенсоров обратной связи, если крутящий момент при заданной скорости выше необходимого для вращения шнековой пары во время экструзии, что позволит упростить программу управления и электронную составляющую устройства.



Рисунок 4 – Шаговый двигателя Nema 34 (86HS156-5004)

Таблица 1 – Технические характеристики приводов экструзионной машины

Узел устройства			Модель двигателя		
Шнековая пара			Nema 34 (86HS156-5004)		
Технические характеристики					
Угол шага (°)	Ток (А)	Номинальное напряжение (В)	Сопротивление Фазы (Ом)	Фазная Индуктивность (мГн)	Момент удержания (Кг, см)
1.8	5	24	0,5	6	100
Узел устройства			Модель двигателя		
Модуля протяжки нити			Nema 23		
Технические характеристики					

Продолжение таблицы 1

Угол шага (°)	Ток (А)	Номинальное напряжение (В)	Сопротивление Фазы (Ом)	Фазная Индуктивность (мГн)	Момент удержания (Кг, см)
1.8	5	24	0,5	6	100
Узел устройства			Модель двигателя		
Модуль намотки нити			Nema 23		
Технические характеристики					
Угол шага (°)	Ток (А)	Номинальное напряжение (В)	Сопротивление Фазы (Ом)	Фазная Индуктивность (мГн)	Момент удержания (Кг, см)
1.8	5	24	0,5	6	100
Узел устройства			Модель двигателя		
Модуль намотки нити			Nema 23		
Технические характеристики					
Угол шага (°)	Ток (А)	Номинальное напряжение (В)	Сопротивление Фазы (Ом)	Фазная Индуктивность (мГн)	Момент удержания (Кг, см)
1.8	5	24	0,5	6	100

Планетарные редукторы PX86N010S0, показанные на рисунке 5, отличаются от аналогов благодаря высокому сроку службы, точности позиционирования и прочности. Универсальный корпус для установки редуктора к шаговому двигателю форм-фактора Nema 34 позволяют отказаться от переходных плит, дополнительных конструкций. Также на вале редуктора предусмотрен паз для установки шпонки, благодаря чему вал привода и вал редуктора не проворачиваются друг относительно друга. Планетарный редуктор PX86N010S0 имеет передаточное число 1:10.



Рисунок 5 – Планетарный редуктор (PX86N010S0)

Таблица 2 – Технические характеристики планетарного редуктора (PX86N010S0)

Передаточное отношение	Крутящий момент выходного вала	КПД	Номинальная скорость вращения
1:10	80 Н*м	90%	3000 об/мин

Кулачковая муфта GE, показанная на рисунке 6 состоит из двух полумуфт, между которыми помещена звездочка. Она выполняет роль упругого элемента, компенсирующего возможные смещения сопряженных валов и ударные нагрузки, снижая нагрузку на редуктор и вал шнековой пары. В муфте выполнены пазы для установки шпонки, а также гужоны для фиксации осей.



Рисунок 6 – Муфта кулачковая соединительная (GE-40-66-14x16)

Таблица 3 – Технические характеристики муфты кулачковой соединительной (GE-40-66-14x16)

Количество лепестков	Твердость полимерных лепестков, Шор	Типоразмер лепестков	Момент, Н*м	Скорость, об/мин
6	98А	GE 19	20	19000

Модуль экструзии состоит из материального цилиндра, шнека, формирующей головки, бункера для загрузки сырья, нагревательных элементов, термопар. Также используется водяная рубашка для предотвращения перегрева гранул в загрузочном бункере, так как перегрев приводит к размягчению полимера и затрудняет его доступ к шнековой паре. Конструкция показана на рисунке 7. Подробное описание процессов экструзии дано в книге Tadmor Z., Gogos C.G. [22].

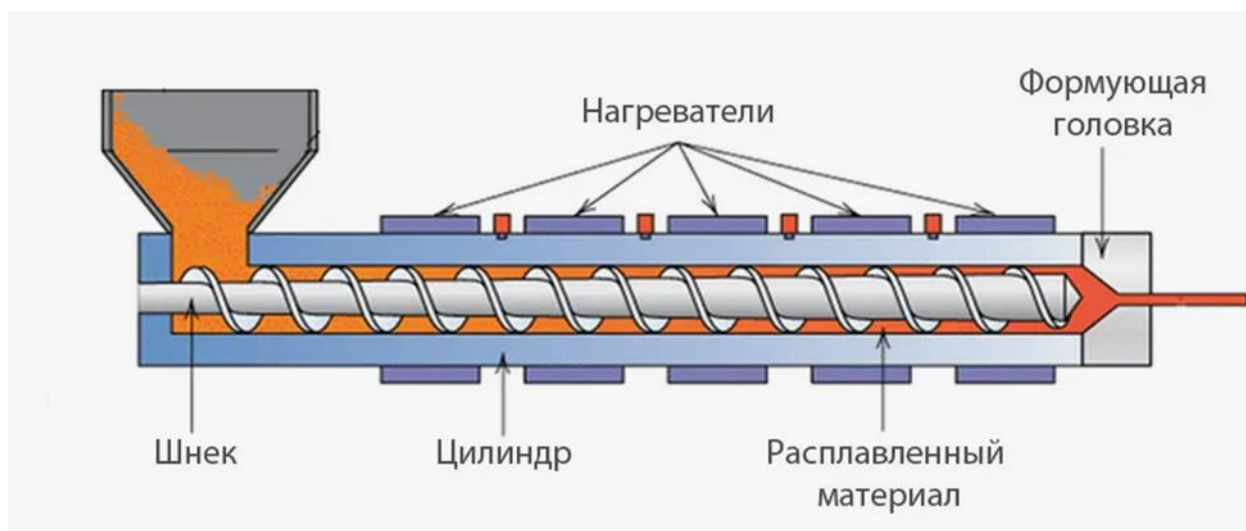


Рисунок 7 – Конструкция в разрезе модуля экструзии

Готовый комплект шнековой пары, показанный на рисунке 8, состоит из материального бункера, шнека, формирующей головки с отверстием диаметром 1,75 мм. Материальный бункер представляет из себя трубу с нарезанной резьбой, отверстием формы паза, 4 отверстиями М4 и 16

отфрезерованной площадкой для фиксации накопителя сырья, к которой приварена площадка для крепления к приводу. Формирующая головка имеет резьбу для смены и отчистки.

В материальном бункере расположены отверстия с нарезанной резьбой для крепления температурных датчиков.



Рисунок 8 – Шнековая пара

Таблица 4 – Технические характеристики шнековой пары

Диаметр шнека	25 мм
Длина шнека	600 мм
Твердость после закалки и отпуска:	HB280-320 Br
Шероховатость	Ra 0.4μm
Производительность	3 кг/час

В конструкции экструзионной установки для нагрева шнека применяется хомутовый кольцевой нагреватель, показанный на рисунке 9, с номинальной мощностью 220 Вт, рассчитанный на питание от сети переменного тока напряжением 220 В. Данный нагревательный элемент установлен в виде латунного кольца, охватывающего цилиндрическую

поверхность экструдера с внешним диаметром 40 мм [11]. Конструкция хомута обеспечивает плотный охват цилиндра, исключая теплопотери и способствуя равномерному нагреву зоны плавления полимеров. Корпус нагревателя изготовлен из латуни, обладающей высокой теплопроводностью и коррозионной стойкостью. Электропитание осуществляется через твердотельное реле, что обеспечивает безопасное и надежное управление нагревом с высокой скоростью переключения и минимальным уровнем шума. В экструдере реализовано три температурные зоны, каждая из которых оборудована отдельным хомутовым нагревателем, каждая из которых задается индивидуально в зависимости от используемого для экструзии сырья. Данная конфигурация позволяет гибко настраивать температурный профиль шнека по длине, обеспечивая последовательное и равномерное плавление полимера.



Рисунок 9 – ТЭН хомутовый

Для контроля температуры в зонах нагрева экструзионного шнека используется термопара типа К, как показано на рисунке 10, с резьбовым креплением формата М6 и длиной измерительного зонда 200 мм. Данный

датчик применяется для контактного измерения температуры в диапазоне до 800 °С, что позволяет надёжно контролировать термический режим в процессе экструзии термопластов. Конструктивно термопара выполнена в виде металлического щупа с нержавеющей оболочкой, что обеспечивает защиту от механических повреждений и агрессивной среды, характерной для зон плавления полимеров. Резьбовое соединение позволяет жёстко фиксировать термопару в теле цилиндра экструдера, обеспечивая точную и повторяемую установку. На термопары нанесена термопаста для точного снятия и контроля значений.



Рисунок 10 – Термопара type-K М6

Сигнал термопары усиливается и преобразуется в цифровую форму посредством модуля MAX6675, показанный на рисунке 11, подключенного к микроконтроллеру. В системе применяются три термопары, каждая из которых обслуживает соответствующую зону нагрева шнека, обеспечивая индивидуальное регулирование температуры и реализацию температурного профиля вдоль длины канала экструзии. Использование MAX6675 обеспечивает высокую точность измерений до 0,25 °С и надёжную

фильтрацию шумов благодаря встроенному АЦП и цифровому интерфейсу SPI. Такая комбинация термодатчиков и электроники управления обеспечивает надёжный температурный контроль, критически важный для стабильности процесса экструзии и качества получаемого филамента.



Рисунок 11 – Модуль MAX6675

В составе силовой части экструзионной установки применяются твердотельные реле SSR-25 DA, показанное на рисунке 12, предназначенные для бесконтактного управления переменными нагрузками с номинальным током до 25 А при напряжении до 380 В. Реле выполнено на основе симистора с опторазвязкой и предназначено для коммутации нагрузки по управляющему сигналу постоянного напряжения 3–32 В. Благодаря отсутствию механических контактов, твердотельное реле обеспечивает высокую надёжность, длительный срок службы, отсутствие искрения при переключении и возможность работы в условиях частых коммутаций.

В данной системе SSR-25 DA используется для управления пятью отдельными нагрузками:

- тремя хомутовыми нагревателями, обеспечивающими три независимые зоны температурного регулирования вдоль шнека экструдера;

– нагревательным элементом модуля охлаждения, поддерживающим температуру жидкости в диапазоне 70–75 °С, необходимую для охлаждения после экструзии филамента;

– циркуляционной помпой, обеспечивающей принудительную перекачку теплоносителя в контуре охлаждения.

Управление всеми реле осуществляется с микроконтроллера через логические выходы (GPIO), обеспечивающие включение и отключение нагрузки по команде алгоритма.

Применение SSR-25 DA в составе системы позволило реализовать безопасное и эффективное управление высокотемпературными и индуктивными нагрузками без использования громоздких электромеханических реле, обеспечив при этом компактность конструкции, высокую частоту коммутаций и отсутствие механического износа.



Рисунок 12 – Реле твердотельное SSR-25 DA

В качестве основного управляющего контроллера в экструзионной системе используется микроконтроллер ESP32-S3, показанный на рисунке 13 - высокопроизводительное встраиваемое решение с 32-битным

двухъядерным процессором Xtensa LX7 и встроенной поддержкой Wi-Fi и Bluetooth LE. Этот микроконтроллер разработан компанией Espressif специально для задач, требующих высокой вычислительной мощности, расширенных интерфейсов ввода-вывода и поддержки взаимодействия с удалёнными устройствами. Тактовая частота процессора достигает 240 МГц, объём оперативной памяти — до 512 КБ, а встроенный модуль флеш-памяти позволяет размещать пользовательскую прошивку и данные интерфейса.

В рассматриваемом проекте ESP32-S3 управляет всеми ключевыми процессами: считывает показания с температурных датчиков через интерфейсы SPI модули MAX6675 и 1-Wire датчики DS18B20, формирует сигналы управления твердотельными реле по GPIO-выходам, а также координирует работу шаговых двигателей через драйверы типа TB6600 и 2DM860. Программная логика реализована с применением встроенного веб-сервера GyverHub, обеспечивающего полноценный пользовательский интерфейс для настройки параметров экструзии и мониторинга состояния оборудования в реальном времени.

Благодаря широкому набору периферии, низкому энергопотреблению и возможности беспроводной связи, ESP32-S3 обеспечивает компактность и гибкость конструкции, позволяя реализовать автономное и интеллектуальное управление процессом экструзии без необходимости подключения к внешнему ПК или серверу. Микроконтроллер функционирует под управлением прошивки, написанной в среде Arduino IDE, с использованием библиотек для PID-регулирования, обработки сигналов, а также управления реле, термодатчиками и шаговыми приводами. Применение ESP32-S3 позволило реализовать современный, надёжный и легко масштабируемый программно-аппаратный комплекс управления экструдером.

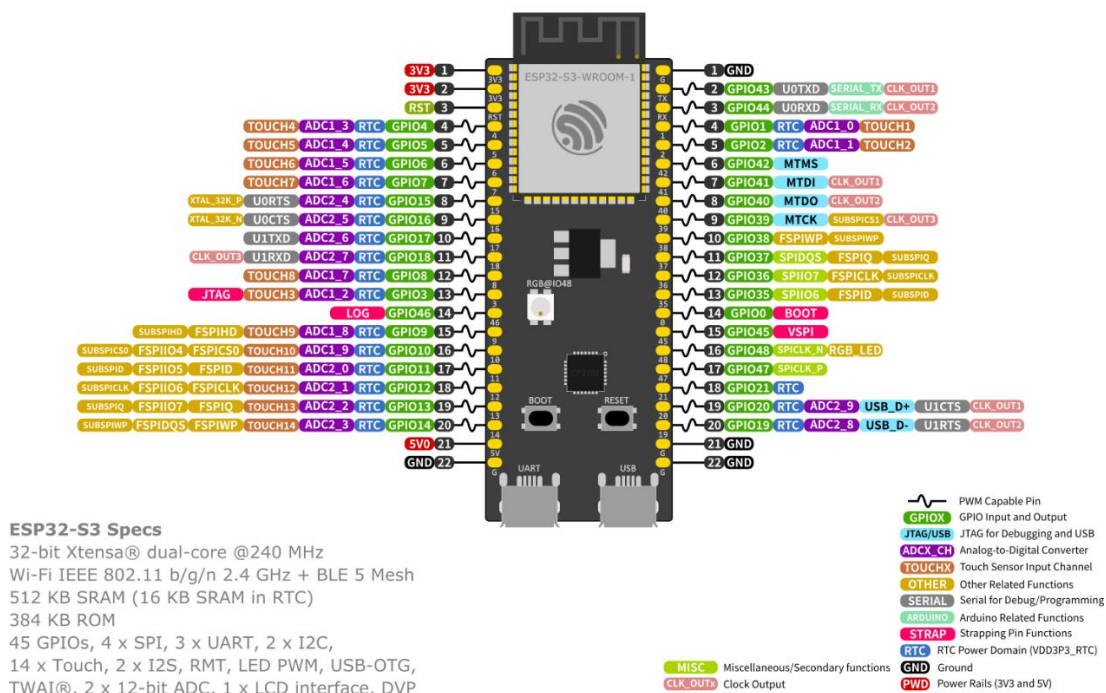


Рисунок 13 – Микроконтроллер ESP32-S3

ТВ6600 - драйвер шагового двигателя, показанный на рисунке 14, предназначенный для управления биполярными шаговыми двигателями в системах автоматизации, станках с ЧПУ, 3D-принтерах и других проектах, требующих точного позиционирования. Он основан на микросхеме Toshiba ТВ6600HG, которая обеспечивает стабильную работу и высокий ток. Драйвер ТВ6600 выбран за его совместимость с шаговыми двигателями форм-фактора Nema 23[15].

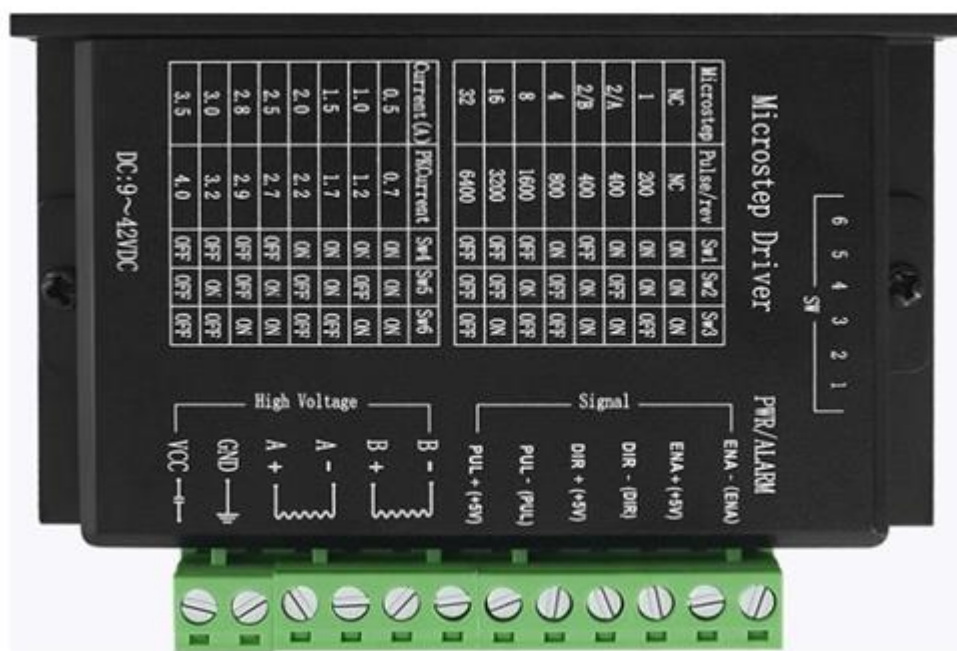


Рисунок 14 – Драйвер шагового двигателя TB6600

Таблица 4 – Технические характеристики драйвера шагового двигателя TB6600

Ток (А)	Номинальное напряжение (В)	Частота входных импульсных сигналов, кГц	Управляющий сигнал
0.5-3.5	9-40	0-100	STEP/DIR/ ENA

Назначение выводов

- ENA+ / ENA- — включение драйвера (enable);
- DIR+ / DIR- — направление вращения;
- PUL+ / PUL- — импульсы (шаги);
- A+, A-, B+, B- — выводы к обмоткам шагового двигателя;
- VCC / GND — питание драйвера.

2DM860 - драйвер шагового двигателя с микрошаговым управлением на основе технологии DSP (Digital Signal Processing). Драйвер показан на рисунке 15. Он предназначен для управления двухфазными и четырехфазными шаговыми двигателями с высоким крутящим моментом. В проекте используется для управления шаговым двигателем форм-фактора Nema 34.

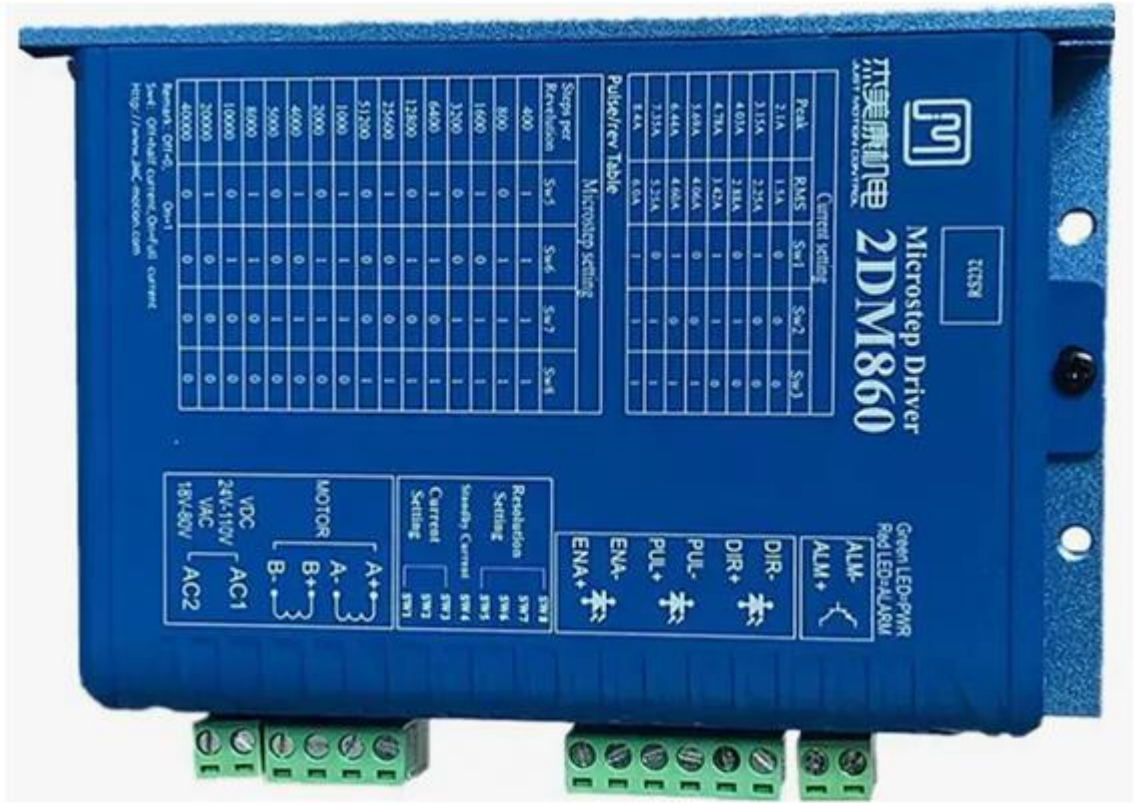


Рисунок 15 – Драйвер шагового двигателя 2DM860

Таблица 5 – Технические характеристики драйвера шагового двигателя 2DM860

Ток (А)	Номинальное напряжение (В)	Частота входных импульсных сигналов, кГц	Управляющий сигнал
1-7.2	24-80	0-200	STEP/DIR/ ENA

MEAN WELL SE-600-24 - промышленный импульсный источник питания, показан на рисунке 16, с выходным напряжением 24 В и мощностью 600 Вт, предназначенный для стабильного электропитания различного оборудования в условиях, требующих высокой надежности и долговечности (рис. 16). Также есть встроенная защита от короткого замыкания, перегрузки, перенапряжения, перегрева.



Рисунок 16 – Блок-питания MEAN WELL SE-600-24

Цифровой температурный датчик DS18B20, показанный на рисунке 17, применяется в составе системы охлаждения экструзионной установки для контроля температуры теплоносителя в модуле жидкостного охлаждения филамента. Он выполнен в герметичном металлическом корпусе, что обеспечивает надёжную работу в условиях повышенной влажности и контакта с жидкостями. Датчик подключается к микроконтроллеру ESP32 по однопроводному интерфейсу 1-Wire, что позволяет считывать данные с высокой точностью до 0,0625 °C и организовать адресную сеть при необходимости подключения нескольких экземпляров на одной линии [16].

В контуре охлаждения филамента из PETG важна точная термостабилизация воды в диапазоне 70–75 °C. Для этого показания DS18B20 используются в качестве входного сигнала PID-регулятора,

управляющего твердотельным реле, которое в свою очередь включает или отключает нагревательный элемент в модуле охлаждения. Таким образом, реализуется автоматическое поддержание необходимой температуры, предотвращающее деформацию филамента и обеспечивающее его стабильную геометрию.

DS18B20 отличается простотой подключения, цифровым выходом, встроенной функцией самокалибровки и высокой устойчивостью к шумам, что делает его надёжным решением для температурного контроля в лабораторных и промышленных условиях.



Рисунок 17 – Датчик температурный DS18B20

В системе жидкостного охлаждения экструзионной установки применяется автомобильная циркуляционная помпа, показанная на рисунке 18, рассчитанная на питание от источника постоянного тока напряжением 24 В. Выбор данного компонента обусловлен его широкой доступностью,

устойчивостью к непрерывной работе и хорошей совместимостью с замкнутыми системами охлаждения.



Рисунок 18 – Помпа модуля охлаждения

На приведённой принципиальной электрической схеме изображена система управления экструдером, построенная на базе микроконтроллера ESP32-S3. Схема включает в себя узлы управления температурой, шаговыми приводами, твердотельными реле и системой охлаждения. Все соединения, управляющие сигналы и элементы защиты выполнены согласно требованиям ЕСКД, схема построена в среде КОМПАС-3D.

Центральным элементом системы является микроконтроллер ESP32-S3, который обрабатывает сигналы от датчиков, управляет исполнительными устройствами и осуществляет обмен данными по Wi-Fi. К выводам контроллера подключены следующие модули:

- термометрические модули на основе MAX6675 (3 шт.) — обеспечивают считывание температуры с термопар типа К. Каждый модуль

подключён по SPI-интерфейсу и обслуживает отдельную зону нагрева экструзионного шнека;

- цифровой датчик температуры DS18B20, подключённый по 1-Wire, используется для мониторинга температуры жидкости в модуле охлаждения. Его показания позволяют поддерживать температуру охлаждающей среды в диапазоне 70–75 °С для работы с PETG;

- пять твердотельных реле SSR-25 DA, управляемых по логическому уровню от ESP32. Три реле коммутируют питание нагревателей трёх зон шнека, одно — нагревательный элемент охлаждающей ванны, пятое — циркуляционную помпу, обеспечивающую перекачку жидкости в замкнутом контуре;

- драйверы шаговых двигателей: TB6600 3 шт. — для управления механизмами намотки и протяжки филамента (драйверы подключены к ESP32 по интерфейсу STEP/DIR/ENA. Обмотки двигателей и питание подключены согласно типовой схеме включения); 2DM860 подключен к более мощной обмотке — привод шнека, требующий повышенного крутящего момента.

Сигналы управления (STEP, DIR, ENA) от ESP32 подаются на соответствующие входы драйверов. Также предусмотрен модуль USB-TCP232-T2 (на схеме — преобразователь интерфейса UART в Ethernet), обеспечивающий подключение к удалённому интерфейсу или промышленной сети.

Отдельно показан блок питания (не размечен, но подразумевается источник 24 В для двигателей и 220 В для силовых цепей). Входы реле подключены к сети переменного тока (фазный и нулевой провод), а выходы — к нагрузке (нагреватели и насос). Управляющая часть схемы полностью гальванически развязана от силовой за счёт оптронов внутри SSR (рис.20).

Особенности конструкции:

- устройство имеет модульную структуру: каждая зона нагрева управляется независимо;
- силовая часть (нагреватели и помпа) отделена от логики управления, что повышает надёжность и безопасность;
- датчики температуры и драйверы двигателей интегрированы в единую систему управления на базе ESP32, что упрощает синхронизацию данных и управление.

Схема, показанная на рисунке 19, отражает все ключевые связи между элементами, обеспечивает управление технологическими параметрами (температурой, подачей, охлаждением) и может быть использована как основа для трассировки печатной платы или построения монтажной схемы (приложение Б, рисунок Б.1). На рисунке 20 показана сборка блока управления.

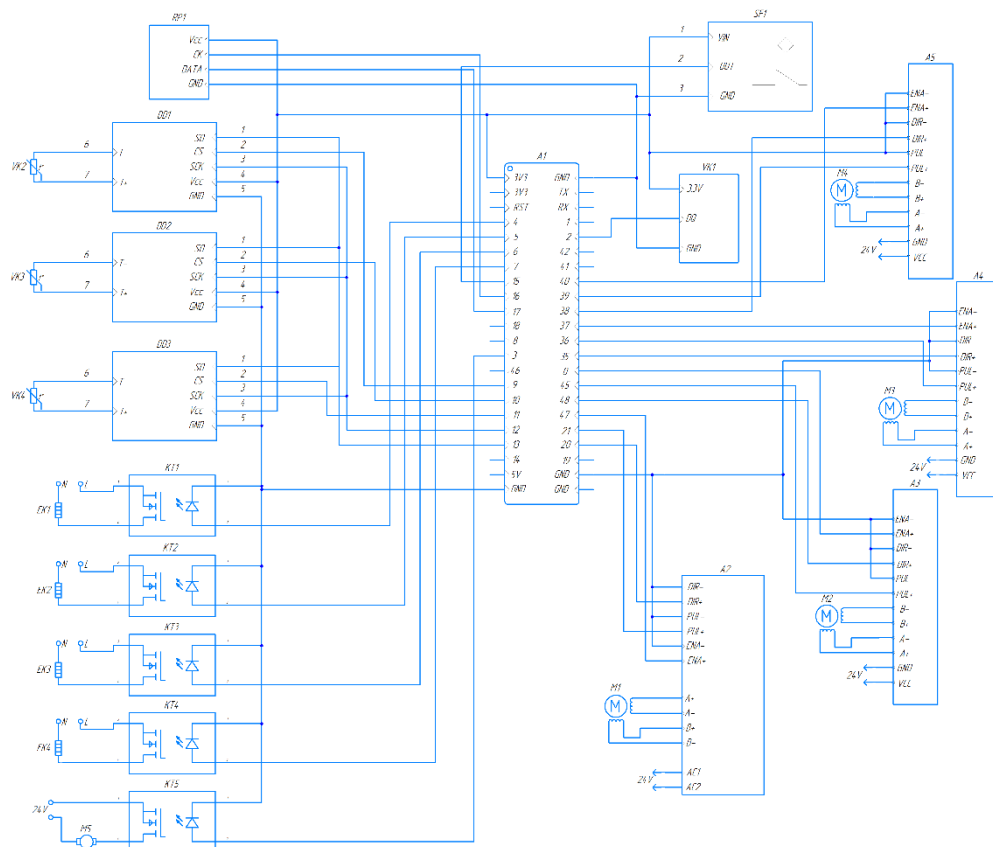


Рисунок 19 – Принципиальная схема электронного блока управления

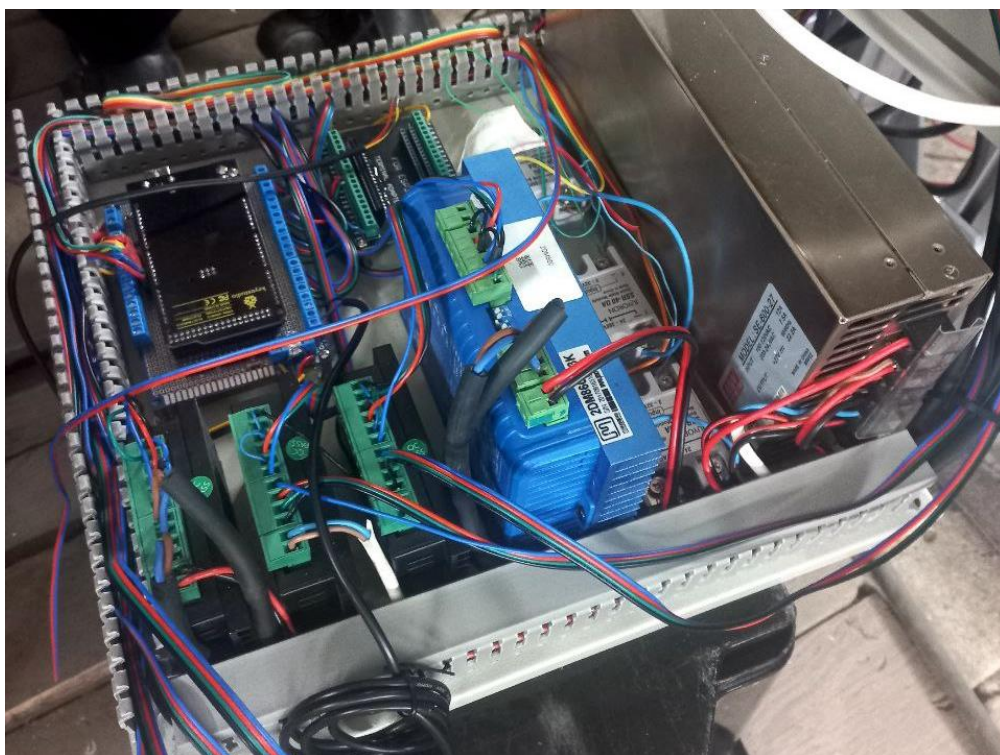


Рисунок 20 – Сборка блока управления

Спроектированный модуль экструзии показан на рисунке 21 и представляет собой связку рассматриваемых ранее технических решений. Для вращения шнека используется шаговый двигатель Nema 34 в сборе с планетарным редуктором [9]. Для соединения редуктора и шнека используется кулачковая муфта.

Для разработки экструзионной машины было выбрано программное обеспечение Autodesk Inventor 2023 [17]. Система автоматизированного проектирования позволяет создавать трехмерные модели, сборки, производить расчет зубчатых колес и прочностные расчеты за счет встроенных калькуляторов, обладает библиотекой готовых, стандартизированных изделий, имеет возможность создавать файлы DXF и DWG для лазерной резки, сохранять файлы формата STL для печати и файлы

формата STEP для экспорта готовых проектов. Для изготовления устройства использовалась лазерная резка, листовая гибка, FDM 3D-печать, CAD-проектирование, полуавтоматическая сварка, навыки работы с ручным, электрическим и пневматическим инструментом. Принципы работы FDM 3D-печати подробно рассмотрены в источнике [20].

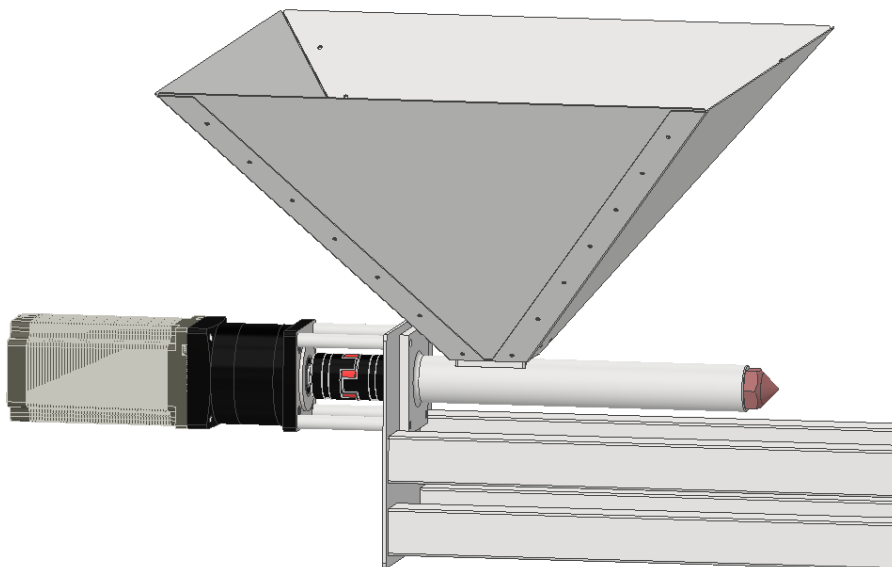


Рисунок 21 – Модуль экструзии филамента

Готовые узлы устанавливаются на изготовленную раму из профильной трубы и пластин показаны на рисунке 22, вырезанных на лазерном станке.

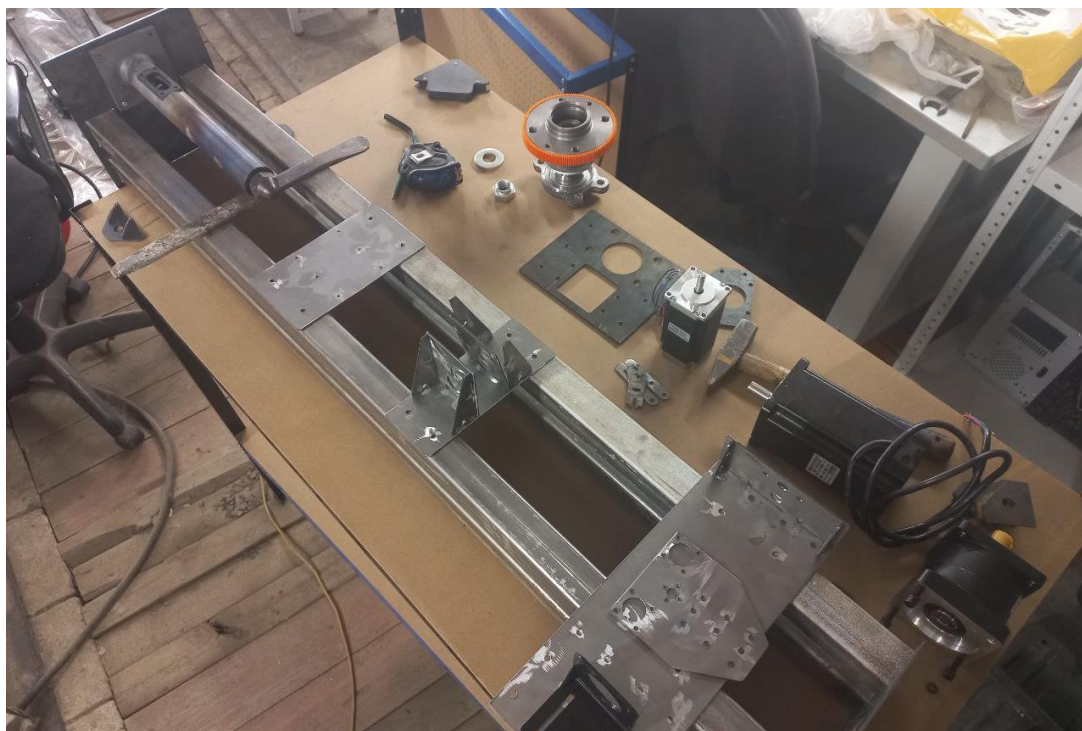


Рисунок 22 – Изготовление рамы из профильной трубы

Бункер для загрузки сырья выполнен из листового металла. Для создания монолитной конструкции, которая позволит загружать до 24 кг полимеров, были произведены операции на листогибочном станке, после чего пневматическим клепочником произведена сборка, показанная на рисунке 23.

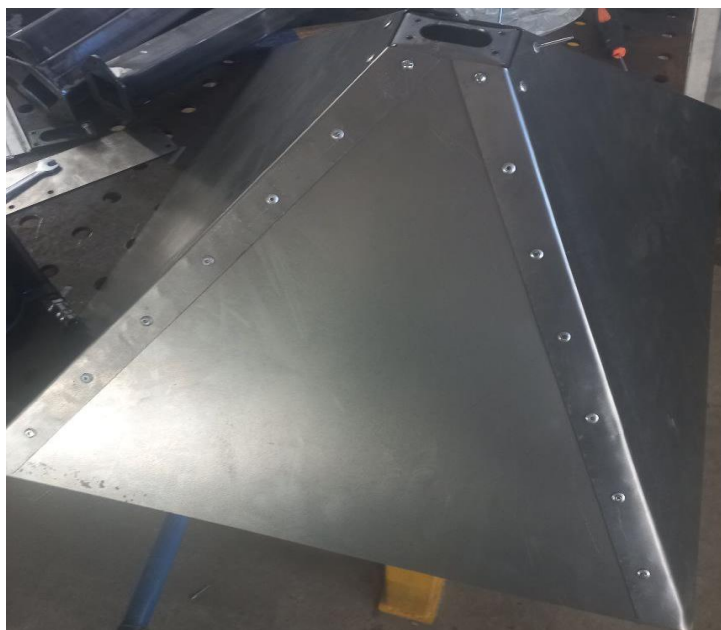


Рисунок 23– Изготовление бункера для загрузки сырья

При экструзии филамента важным этапом является охлаждение горячего полимера с сохранением геометрии, полученной при выдавливании через формирующую головку. Резкое охлаждение нити приводит к сжатию прутка, появлению эксцентриситета и перепадам диаметра.

Существуют три разновидности охлаждения полимера: воздушное охлаждение, жидкостное, комбинированное.

Воздушное охлаждение является технически простым из возможных решений, так как в конструкции используются вентиляторы. К минусам подобного решения можно отнести изменчивость, нестабильность охлаждения при изменении внешних условий: температуры, газодинамики в помещении. Данное решение показано на рисунке 24.

Жидкостное охлаждение представляет из себя конструкцию из ванны охлаждения и расширительного сосуда. Как правило, в расширительных сосудах устанавливается нагревательный элемент, датчик температуры для выставления и контроля значения. Для циркуляции жидкости из

расширительного сосуда в ванну охлаждения используют водяной насос, помпу. Данное решение показано на рисунках 25 – 26.

Комбинированное охлаждение представляет собой связку воздушного и жидкостного охлаждения. Такая конструкция позволяет изготавливать филаменты из гибких материалов, для которых не приемлема быстрая скорость жидкостного охлаждения: термополиуретана (TPU), полистирола (HIPS), а также базовые полимеры, для которых оптимально подходит жидкостное охлаждение: полиэтилентерефталат-гликоль (PETG), акрилонитрилбутадиенстирол (ABS), полилактид (PLA). К недостаткам можно отнести габариты комбинированного модуля охлаждения, из-за чего такое решение используются на стационарных линиях для крупносерийного производства филамента.



Рисунок 24 – Экструдеры с воздушным охлаждением полимера

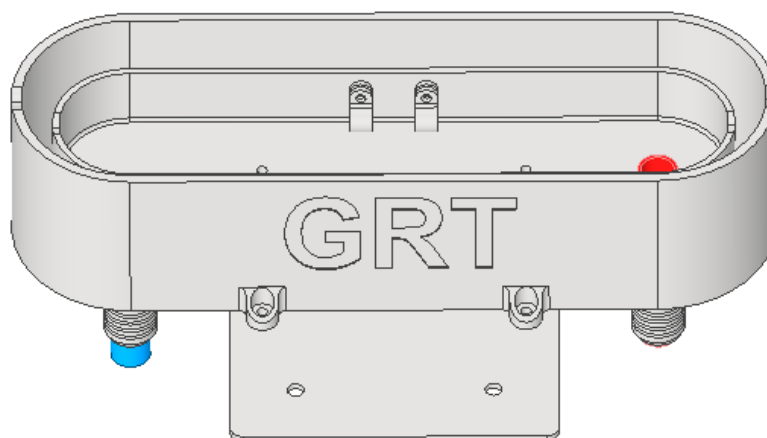


Рисунок 25 – Ванна охлаждения нити



Рисунок 26 – Изготовленная ванна охлаждения полимера

Для измерения полученной нити используется цифровой индикатор, показанный на рисунке 27. В промышленных версиях оборудования применяются лазерные микрометры Omron z41c-s28 (Япония), которые позволяют диагностировать отклонения нити по 2-ум осям, обладают своим контроллером управления, имеют высокую стоимость и трудности с

приобретением из-за отсутствия официального дистрибьютера продукции [19].



Рисунок 27 – Лазерный микрометр Omron

Цифровой индикатор Mitutoyo 543-781, показанный на рисунке 28, представляет собой высокоточное контрольно-измерительное средство, предназначенное для линейных контактных измерений с цифровой индикацией результата. Устройство широко применяется в машиностроении, приборостроении, метрологических лабораториях и на предприятиях, где требуется обеспечение стабильного контроля геометрических параметров.

Mitutoyo 543-781 относится к средствам измерений контактного типа и предназначен для выполнения точных линейных измерений в диапазоне до 12,7 мм. Прибор обеспечивает получение абсолютных и относительных значений перемещения с цифровой индикацией. Он применяется в измерительных стойках, координатно-измерительных машинах, калибровочных установках, а также в составе автоматизированных измерительных систем.

Цифровой индикатор построен на основе индуктивного измерительного преобразователя, интегрированного с системой цифровой обработки сигнала и ЖК-дисплеем.



Рисунок 28 – Цифровой индикатор Mitutoyo 543-781

Модуль измерения диаметра филамента, представленный на изображении, выполнен на базе двух рычажных плеч, обеспечивающих кинематическую свободу измерительной каретке. Основным элементом измерения служит цифровой индикатор, закреплённый на подвижной оси, которая взаимодействует с центральным измерительным подшипником. Для точного линейного перемещения и разгрузки штока индикатора от боковых нагрузок используется рельсовая направляющая с установленной подшипниковой кареткой. Это решение позволяет снизить трение и исключить паразитные нагрузки, которые могут вызвать деформацию или погрешность в измерениях.

В конструкцию интегрированы опорные и направляющие ролики с установленными радиальными подшипниками, что обеспечивает стабильное и контролируемое прохождение нити через измерительный узел. Подбор

подшипников был выполнен с учётом минимизации износа при длительной работе и постоянной протяжке материала. Наличие роликов по обе стороны филамента позволяет центрировать нить в измерительном зазоре, обеспечивая точное считывание диаметра без перекосов.

Все узлы смонтированы на жёстком основании из листового металла с крепёжными отверстиями для последующей интеграции в состав экструзионной линии. Данная конструкция, показанная на рисунке 29, позволяет производить высокоточные контактные измерения с высокой повторяемостью, критически важные для обеспечения стабильного качества филамента.

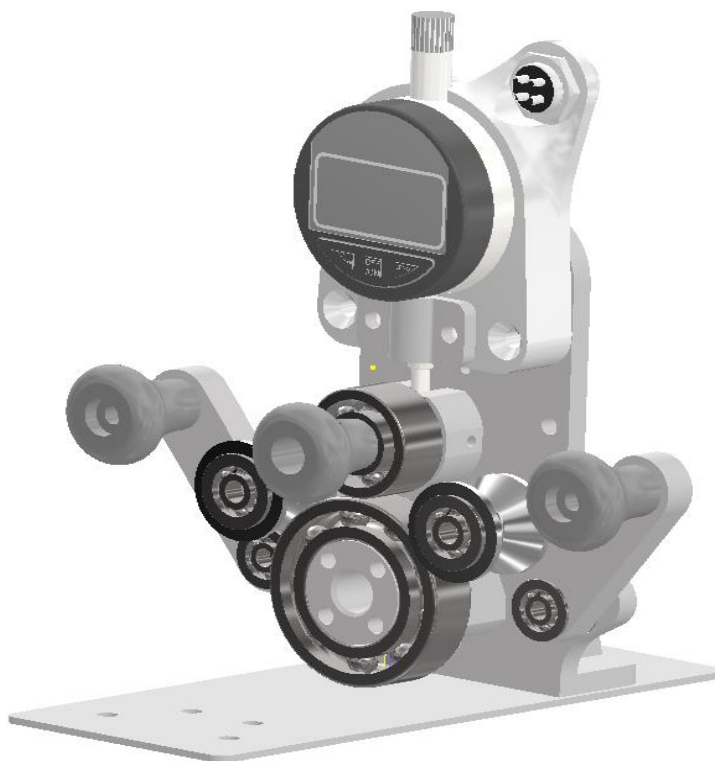


Рисунок 29 – Сборка модуля измерения нити

На рисунке 30 представлен модуль протяжки филамента, выполненный на базе шагового двигателя Nema 23 и зубчатых роликов, обеспечивающих надёжное и контролируемое движение полимерной нити после выхода из

зоны охлаждения. Основным элементом передачи усилия на филамент служит прижимной ролик марки ЗУБР диаметром 50 мм, выполненный из металла с антискользящей поверхностью. Ролик установлен на подшипниках, что обеспечивает его свободное вращение при минимальных потерях на трение и гарантирует долговечность узла.

Приводной вал ролика жёстко соединён с валом шагового двигателя Nema 23, обеспечивающим прецизионное вращение с возможностью микрошагового управления. Такое решение позволяет точно дозировать скорость протяжки и стабилизировать диаметр филамента. Противоположный ролик выполнен на подвижной каретке с возможностью регулировки прижимного усилия. Для исключения люфтов и увеличения ресурса конструкции в узле использованы радиальные подшипники, установленные во всех опорных точках вращения.

В конструкции предусмотрена жёсткая несущая рама с опорной пластиной, выполненной из металла, обеспечивающей стабильное крепление модуля на шасси установки. Применение стандартных компонентов (двигатель, ролики, подшипники) позволило упростить изготовление, повысить надёжность и упростить обслуживание модуля. Благодаря высокой точности позиционирования шагового двигателя модуль может использоваться как с ручным, так и с автоматическим управлением на основе обратной связи от модуля измерения диаметра филамента.

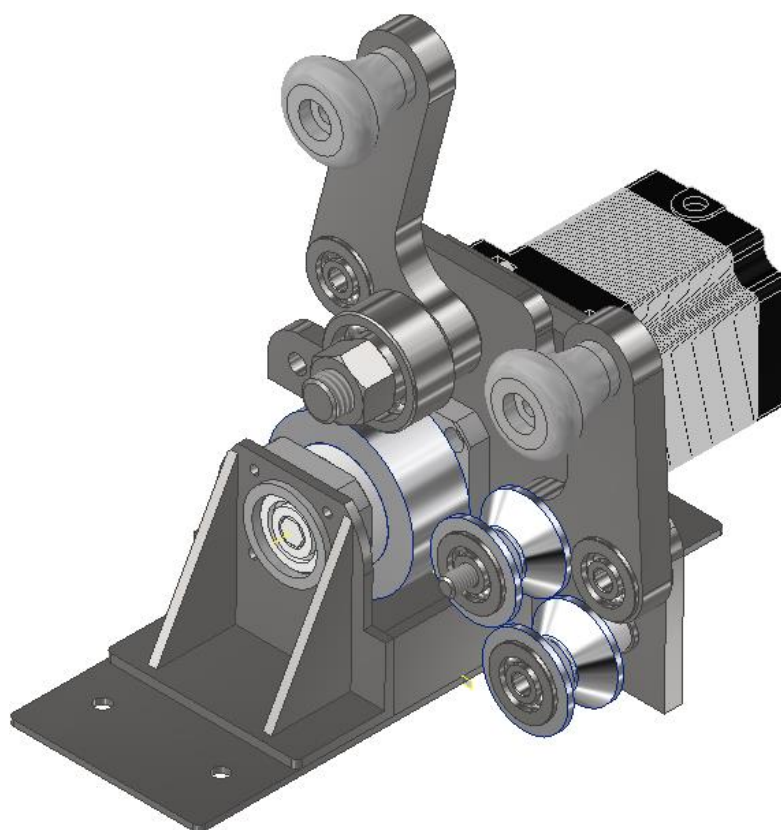


Рисунок 30 – Модуль протяжки нити

Для модуля намотки нити изготовлен узел, состоящий из автомобильной ступицы, зубчатых колес и шагового двигателя. Применение массовых изделий способствуют снижению себестоимости итогового продукта. Зубчатые колеса изготовлены при помощи 3Д-печати из полиамида, за счет свойств нейлона не требуют дополнительного ухода, профилактики. Привод и его сборка показаны на рисунках 31 и 32 соответственно.

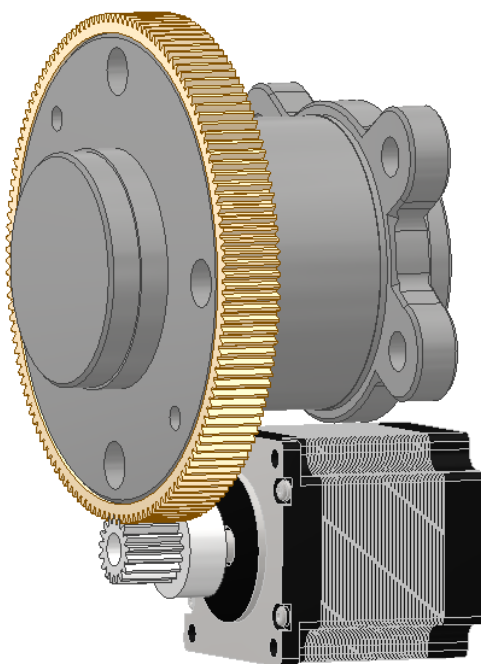


Рисунок 31 – Привод намотки нити

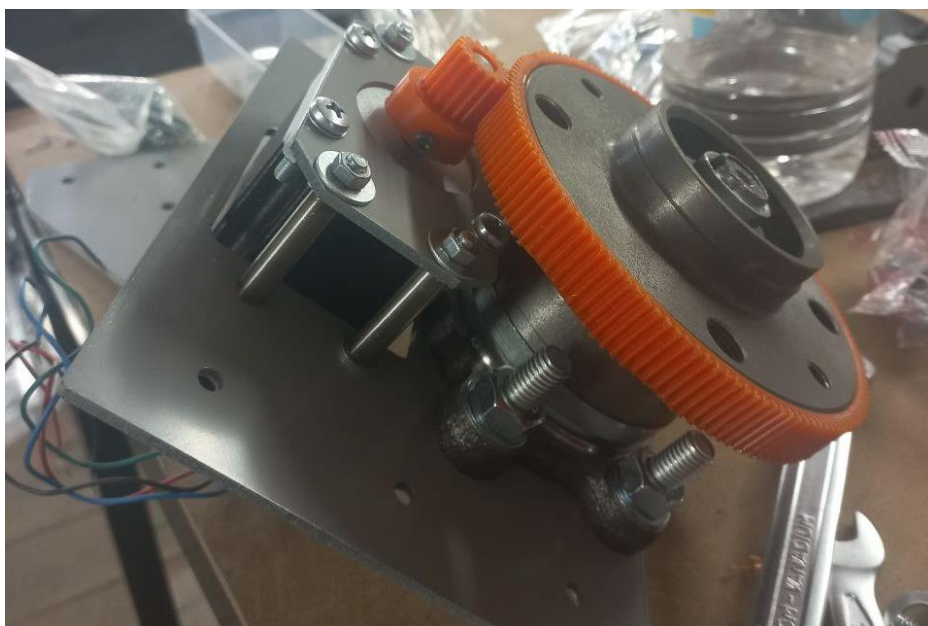


Рисунок 32 – Сборка привода намотки нити

На рисунке 33 представлен модуль намотки филамента, предназначенный для аккумуляирования изготовленной полимерной нити на

катушку. Конструкция, показанная на рисунке 34, выполнена на базе жёсткого основания из стального профиля, обеспечивающего устойчивость и точную геометрию при работе. Намоточный барабан имеет диаметр, обеспечивающий равномерную укладку нити без перегибов, и собран из алюминиевых или стальных листовых элементов, соединённых винтовыми соединениями. Центр барабана установлен на приводной оси, соединённой с шаговым двигателем или редукторным мотором.

Особенностью конструкции является использование конструкционного профиля и сборных элементов, что позволяет оперативно вносить изменения в геометрию, диаметр, ширину барабана или систему укладки в процессе опытной эксплуатации. Такая модульность особенно важна на этапе отладки системы экструзии и подбора оптимальных параметров намотки для различных типов полимеров и диаметров филамента.

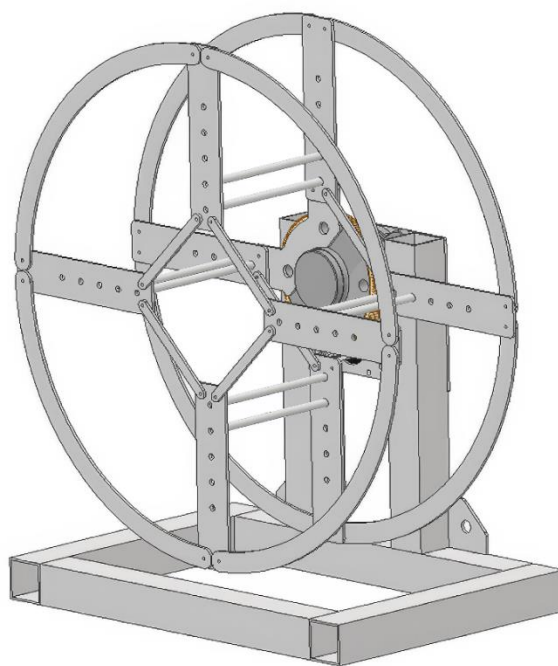


Рисунок 33 –Модуль намотки нити



Рисунок 34 – Сборка модуля намотки из конструкционного профиля

3 Программирование устройства

GyverHub — это легковесный динамический пользовательский веб-интерфейс, показанный на рисунке 35, разработанный для микроконтроллерных платформ на базе ESP. Интерфейс позволяет в реальном времени визуализировать данные, управлять параметрами и взаимодействовать с устройством через стандартный веб-браузер. Он предоставляет универсальный подход к построению HMI (Human-Machine Interface) без необходимости применения внешнего сервера или облачных решений.

GyverHub реализуется как встроенный HTTP/WebSocket сервер, работающий непосредственно на контроллере ESP, как показано на рисунке 36. Интерфейс строится динамически при подключении клиента, при этом структура задаётся внутри программы в функции `build(gh::Builder&)`.

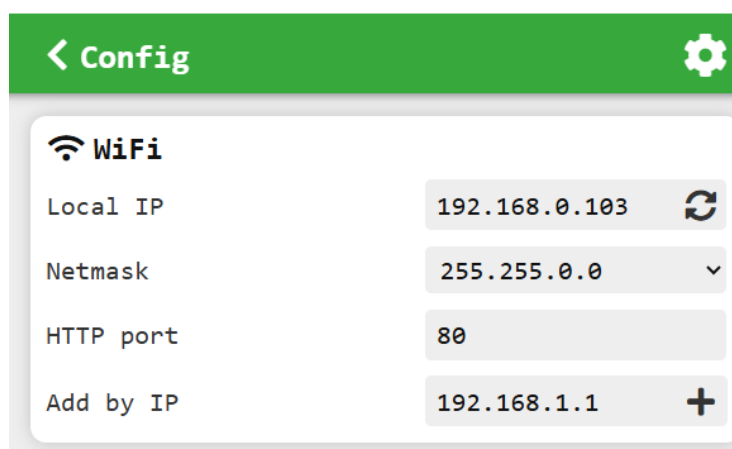


Рисунок 35 – Настройка приложения



Рисунок 36 – Разработка интерфейса для управления линией

Разработка кода производилась в среде Arduino IDE [14]. Выбор платы в среде разработки Arduino IDE показано на рисунке 37. Работа с аппаратной частью Arduino основана на книге Arduino: A Technical Reference [23].

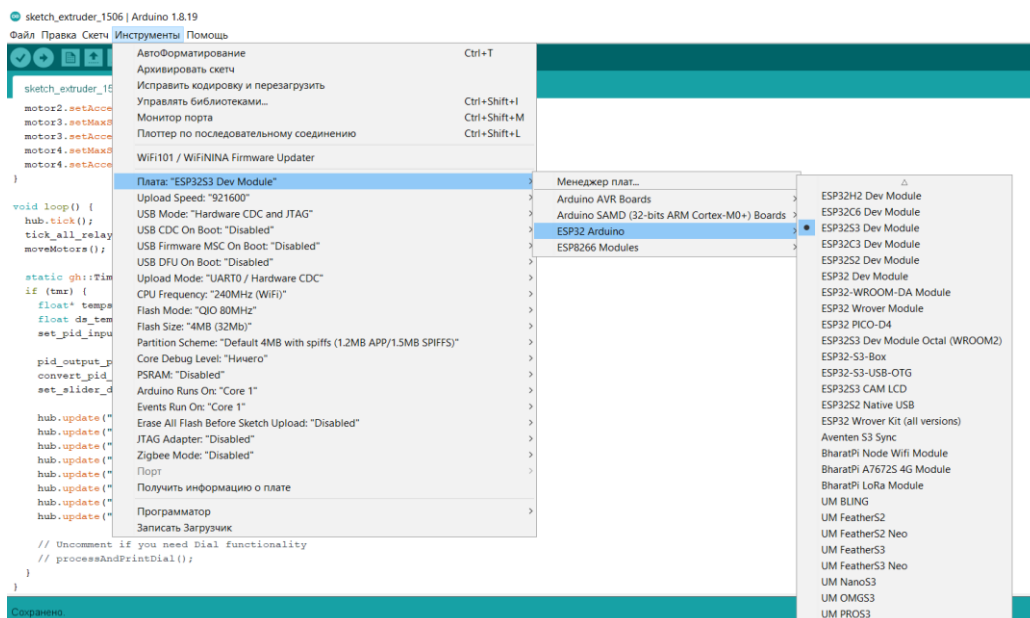


Рисунок 37 – Выбор платы в среде разработки Arduino IDE

```

#define GH_NO_MQTT
#define GH_NO_GET
#define GH_NO_FS
#define GH_NO_FETCH
#define GH_NO_UPLOAD
#define GH_NO_OTA
#define GH_NO_OTA_URL
#define GH_NO_HTTP_TRANSFER
#define GH_NO_HTTP_DNS
#define GH_NO_HTTP_OTA
#define GH_NO_HTTP_PUBLIC
#define GH_NO_HTTP_FETCH
#define GH_NO_HTTP_UPLOAD
#include <GyverDS18.h>
#include <GyverMAX6675.h>
#include <PWMrelay.h>
#include <GyverPID.h>
#include <PIDtuner.h>
#include <PIDtuner2.h>
#include <GyverHub.h>
#include <AccelStepper.h>
IPAddress local_IP(192, 168, 0, 128);
IPAddress gateway(192, 168, 0, 1);
IPAddress subnet(255, 255, 0, 0);
// Настройки Wi-Fi
#define AP_SSID "TP-Link_E3D5" // Замените на имя вашей Wi-Fi сети
#define AP_PASS "44141448" // Замените на пароль от вашей Wi-Fi сети
// GyverHub
GyverHub hub;
// Temperature Sensors (MAX6675)
#define TEMP_CLK_PIN 12
#define TEMP_DATA_PIN 13
#define TEMP_CS_PIN1 11
#define TEMP_CS_PIN2 10
#define TEMP_CS_PIN3 9
GyverMAX6675<TEMP_CLK_PIN, TEMP_DATA_PIN, TEMP_CS_PIN1>
temperature_sensor1;

```

```

GyverMAX6675<TEMP_CLK_PIN, TEMP_DATA_PIN, TEMP_CS_PIN2>
temperature_sensor2;
GyverMAX6675<TEMP_CLK_PIN, TEMP_DATA_PIN, TEMP_CS_PIN3>
temperature_sensor3;
// DS18B20 Temperature Sensor
#define DS_PIN 2
GyverDS18Single ds(DS_PIN);
// Relay Configuration
const int relayPins[] = {3, 4, 5, 6, 7};
const int numRelays = 5;
// Инициализация каждого реле с параметрами
PWMrelay relays[5] = {
    PWMrelay(relayPins[0], HIGH, 1000),
    PWMrelay(relayPins[1], HIGH, 1000),
    PWMrelay(relayPins[2], HIGH, 1000),
    PWMrelay(relayPins[3], HIGH, 1000),
    PWMrelay(relayPins[4], HIGH, 1000)
};
byte relay_values[numRelays] = {0};
// PID Configuration
const int pid_num = 3;
float pid_p = 5.2;
float pid_i = 0.5;
float pid_d = 0.5;
GyverPID regulators[pid_num];
float pid_targets[pid_num] = {40, 40, 40};
float* pid_output_pwm;
// Slider Data
int slider_data[pid_num] = {0};
// Inductance Sensor
#define INDUCTANCE_PIN 15
const int inductance_threshold = 100;
// Stepper Motors Configuration
#define MOTOR1_STEP_PIN 22
#define MOTOR1_DIR_PIN 23
#define MOTOR2_STEP_PIN 24
#define MOTOR2_DIR_PIN 25

```

```

#define MOTOR3_STEP_PIN 26
#define MOTOR3_DIR_PIN 27
#define MOTOR4_STEP_PIN 28
#define MOTOR4_DIR_PIN 29
AccelStepper motor1(AccelStepper::DRIVER, MOTOR1_STEP_PIN,
MOTOR1_DIR_PIN);
AccelStepper motor2(AccelStepper::DRIVER, MOTOR2_STEP_PIN,
MOTOR2_DIR_PIN);
AccelStepper motor3(AccelStepper::DRIVER, MOTOR3_STEP_PIN,
MOTOR3_DIR_PIN);
AccelStepper motor4(AccelStepper::DRIVER, MOTOR4_STEP_PIN,
MOTOR4_DIR_PIN);
// Functions
float* getTemperatures() {
    static float temperatures[3];
    temperatures[0] = temperature_sensor1.readTemp() ?
temperature_sensor1.getTemp() : NAN;
    temperatures[1] = temperature_sensor2.readTemp() ?
temperature_sensor2.getTemp() : NAN;
    temperatures[2] = temperature_sensor3.readTemp() ?
temperature_sensor3.getTemp() : NAN;
    return temperatures;
}
void printTemperatures(float* temps) {
    for (int i = 0; i < 3; i++) {
        Serial.print("Temp");
        Serial.print(i + 1);
        Serial.print(": ");
        if (isnan(temps[i])) {
            Serial.println("Error");
        } else {
            Serial.print(temps[i]);
            Serial.println(" *C");
        }
    }
}
float get_ds_temps() {

```

```

float ds_temperature = -1.0;
if (ds.ready()) {
    if (ds.readTemp()) {
        ds_temperature = ds.getTemp();
    }
    ds.requestTemp();
}
return ds_temperature;
}

bool is_inductance() {
    return analogRead(INDUCTANCE_PIN) < inductance_threshold;
}

void setup_pid() {
    for (int i = 0; i < pid_num; i++) {
        regulators[i].setpoint = pid_targets[i];
    }
}

void setup_pid_input(int pid_selector, float val) {
    regulators[pid_selector].input = val;
}

void set_pid_inputs(float* temps) {
    for (int i = 0; i < pid_num; i++) {
        setup_pid_input(i, temps[i]);
    }
}

float* get_pid_output() {
    static float pid_outs[pid_num];
    for (int i = 0; i < pid_num; i++) {
        pid_outs[i] = regulators[i].getResultTimer();
    }
    return pid_outs;
}

void convert_pid_to_relay() {
    for (int i = 0; i < pid_num; i++) {
        relay_values[i] = (byte)constrain(pid_output_pwm[i], 0, 255);
    }
    set_relay_values();
}

```

```

}
void set_slider_data() {
    for (int i = 0; i < pid_num; i++) {
        pid_targets[i] = (byte)constrain(slid_data[i], 0, 255);
    }
}
void tick_all_relays() {
    for (int i = 0; i < numRelays; i++) {
        relays[i].tick();
    }
}
void set_relay_values() {
    for (int i = 0; i < numRelays; i++) {
        relays[i].setPWM(relay_values[i]);
    }
}
// Dial Functionality (опционально)
/*
void processAndPrintDial() {
    // Реализуйте эту функцию, если вам нужен Dial
}
*/
// Move Motors
void moveMotors() {
    static unsigned long lastMoveTime = 0;
    if (millis() - lastMoveTime > 1000) { // Move every second
        lastMoveTime = millis();
        motor1.moveTo(motor1.currentPosition() + 100); // Move motor1 forward
        motor2.moveTo(motor2.currentPosition() - 100); // Move motor2 backward
        motor3.runSpeed(); // Run motor3 at constant speed
        motor4.runToNewPosition(500); // Move motor4 to position 500
    }
    motor1.run();
    motor2.run();
    motor3.run();
    motor4.run();
}

```

```

void build(gh::Builder& b) {
    {
        gh::Row r(b);
        b.Gauge_("temp_1").label("MAX Temp1").size(2).value(0.0).range(0, 300,
0.1).unit("°");
        b.Gauge_("temp_2").label("MAX Temp2").size(2).value(0.0).range(0, 300,
0.1).unit("°");
        b.Gauge_("temp_3").label("MAX Temp3").size(2).value(0.0).range(0, 300,
0.1).unit("°");
    }
    {
        gh::Row r(b);
        b.GaugeLinear_("power_temp_1").label("Power
Relay1").size(2).value(0).range(0, 255, 1);
        b.GaugeLinear_("power_temp_2").label("Power
Relay2").size(2).value(0).range(0, 255, 1);
        b.GaugeLinear_("power_temp_3").label("Power
Relay3").size(2).value(0).range(0, 255, 1);
    }
    {
        gh::Row r(b);
        b.Slider_("slider_temp_1", &slider_data[0]).label("Slider
Temp1").size(2).value(0).range(0, 300, 1).unit("°");
        b.Slider_("slider_temp_2", &slider_data[1]).label("Slider
Temp2").size(2).value(0).range(0, 300, 1).unit("°");
        b.Slider_("slider_temp_3", &slider_data[2]).label("Slider
Temp3").size(2).value(0).range(0, 300, 1).unit("°");
    }
    {
        gh::Row r(b);
        b.Title("-----").size(2).align(gh::Align::Center);
    }
    {
        gh::Row r(b);
        b.Gauge_("ds_temp_1").label("DS Temp1").size(2).value(0.0).range(0, 120,
0.1).unit("°");
    }
}

```

```

    b.Gauge_("ds_temp_2").label("DS Temp2").size(2).value(0.0).range(0, 120,
0.1).unit("");
    }
    {
        gh::Row r(b);
b.LED_("inductance").label("Inductance").size(2).color(gh::Colors::Red).value(0);
    }
}

void setup() {
    Serial.begin(115200);
    // Configure Static IP
    if (!WiFi.config(local_IP, gateway, subnet)) {
        Serial.println("Failed to configure Static IP");
    }
    // Connect to WiFi
    WiFi.mode(WIFI_STA);
    WiFi.begin(AP_SSID, AP_PASS);
    while (WiFi.status() != WL_CONNECTED) {
        delay(500);
        Serial.print(".");
    }
    Serial.println();
    Serial.println(WiFi.localIP());
    // Initialize GyverHub
    hub.config(F("MyDevices"), F("ESP-228"), F("®"));
    hub.onBuild(build);
    hub.begin();
    // Initialize Sensors and Relays
    ds.requestTemp();
    setup_pid();
    // Initialize Stepper Motors
    motor1.setMaxSpeed(1000);
    motor1.setAcceleration(500);
    motor2.setMaxSpeed(1000);
    motor2.setAcceleration(500);
    motor3.setMaxSpeed(1000);
    motor3.setAcceleration(500);

```

```

    motor4.setMaxSpeed(1000);
    motor4.setAcceleration(500);
}
void loop() {
    hub.tick();
    tick_all_relays();
    moveMotors();
    static gh::Timer tmr(1000);
    if (tmr) {
        float* temps = getTemperatures();
        float ds_temp = get_ds_temps();
        set_pid_inputs(temps);
        pid_output_pwm = get_pid_output();
        convert_pid_to_relay();
        set_slider_data();
        hub.update("temp_1").value(temps[0]);
        hub.update("temp_2").value(temps[1]);
        hub.update("temp_3").value(temps[2]);
        hub.update("ds_temp_1").value(ds_temp);
        hub.update("inductance").value(is_inductance());
        hub.update("power_temp_1").value(pid_output_pwm[0]);
        hub.update("power_temp_2").value(pid_output_pwm[1]);
        hub.update("power_temp_3").value(pid_output_pwm[2]);
        // Uncomment if you need Dial functionality
        // processAndPrintDial();
    }
}

```

4 Технологическая часть

Экструзия полиэтилентерефталат-гликоля

Производство филамента для FDM-печати из полиэтилентерефталат-гликоля (PETG) осуществляется методом экструзии. Исходным сырьём служат гранулы PETG, которые перед подачей в экструдер тщательно просушиваются (например, при $\sim 100^{\circ}\text{C}$ в течение 2 часов) для удаления влаги. Это предотвращает образование пузырей в нити, поскольку PETG гигроскопичен и при нагреве влажного материала происходит вскипание воды с образованием дефектов. Гранулы подаются через бункер в шнековый экструдер, где плавятся и продвигаются вдоль цилиндра шнека. Экструдер имеет несколько последовательно расположенных зон нагрева (в данном эксперименте – три зоны), температуры которых можно регулировать независимо. Обычно реализуется прогрессивный температурный профиль – от более низкой температуры в зоне подачи материала (зона 1) к более высокой в зоне формования (зона 3). Такой профиль обеспечивает поддержание давления расплава: твёрдый или частично плавящийся материал в холодной зоне выталкивает расплав вперёд, способствуя равномерной подаче. В последней зоне расплавленный PETG выдавливается через фильеру (формующую головку) диаметром порядка 2 мм, формируя непрерывную нить. При температуре цилиндра $\sim 200^{\circ}\text{C}$ начинается плавление PETG, а при $\sim 230^{\circ}\text{C}$ расплав начинает вытекать из фильеры. Для получения нити целевого диаметра $\sim 1,75$ мм фильера диаметром $\sim 1,8\text{--}2,0$ мм позволяет небольшое вытяжение расплава при протяжке. На выходе из экструдера разогретая нить проходит через охлаждающую ванну с водой. В данном эксперименте применялось охлаждение водой комнатной температуры ($\sim 20^{\circ}\text{C}$). Быстрое охлаждение в воде практически мгновенно застывает форму нити. Отметим, что температура охлаждения также влияет на форму и внутреннее напряжение материала: так, слишком холодная ванна

“замораживает” текущее сечение нити, создает овальность, тогда как более тёплая вода даёт расплаву чуть больше времени восстановить круглое сечение под действием поверхностного натяжения. В наших условиях комнатная температура воды обеспечила достаточное охлаждение без заметной овальности.

Далее нить поступает на протяжный механизм и наматывается на катушку. Скорость протяжки подбирается таким образом, чтобы диаметр готового филамента стабилизировался на требуемом уровне ~1,75 мм. В промышленном оборудовании реализуют автоматическую регулировку протяжки по сигналу датчика диаметра: например, оптический сенсор измеряет толщину нити и изменяет скорость тянущих роликов, поддерживая диаметр в допустимом диапазоне. В нашем случае скорость протяжки устанавливалась вручную и оставалась постоянной в серии экспериментов с варьированием температуры, и наоборот – при исследовании влияния скорости температура экструзии фиксировалась [13].

Таблица 6 – Экструзия PETG-гранул при изменении нагревательных зон шнековой пары

Температура нагревательных зон шнековой пары, С ⁰			Температура модуля охлаждения, С ⁰	Скорость протяжки, мм/с	Диаметр нити, мм
Зона 1	Зона 2	Зона 3			
90	110	170	70	100	1,5
95	115	175	70	100	1,55
100	120	180	70	100	1,62
105	125	185	70	100	1,73
110	130	190	70	100	1,76
115	135	195	70	100	1,8
120	140	200	70	100	1,88
125	145	205	70	100	1,9

Таблица 7 – Экструзия PETG-гранул при изменении скорости протяжки полученной нити

Температура нагревательных зон шнековой пары, С ⁰			Температура модуля охлаждения, С ⁰	Скорость протяжки, мм/с	Диаметр нити, мм
Зона 1	Зона 2	Зона 3			
110	130	190	70	80	1,5
110	130	190	70	85	1,55
110	130	190	70	90	1,62
110	130	190	70	95	1,73
110	130	190	70	100	1,76
110	130	190	70	105	1,8
110	130	190	70	110	1,88
110	130	190	70	115	1,9

Выводы по разделу 4

В ходе проведения опытов были выбраны оптимальные параметры экструзии для изготовленного оборудования. Опыты показывают, что текучесть полимеров, связанная с изменением температуры, и скорость модуля протяжки, который вытягивает горячую нить, влияют на нить. По полученным результатам можно получить аналитику для разработки обновленных экструзионных машин.

Температурный режим экструзии PETG существенно влияет на равномерность плавления и, как следствие, на стабильность диаметра нити. Недостаточная температура в зоне пластикации приводит к неполному расплавлению гранул, что вызывает пульсации подачи и колебания диаметра, появление овальности или включений твердых частиц. Оптимальная температура должна гарантировать полное плавление PETG к концу шнека, но без перегрева. При соблюдении оптимальных температурных значений диаметр филамента получается близким к целевому и устойчивым во времени. Небольшое увеличение температуры зоны 1 в пределах рабочей “окна процесса” ведет к незначительному росту диаметра, однако в рамках

допусков ($\pm 0,05$ мм) это можно компенсировать регулировкой скорости протяжки. Чрезмерное же повышение температуры ухудшает качество филамента.

Скорость тянущего устройства является главным параметром калибровки диаметра. Малые изменения скорости сразу отражаются на толщине нити: повышая скорость тягова, мы уменьшаем диаметр, и наоборот. Экспериментально показано, что отклонение скорости на $\pm 0,5$ м/мин от настроенного значения ~ 2 м/мин меняет диаметр примерно на $\pm 0,2$ мм. Поэтому для обеспечения стабильного качества филамента (постоянства диаметра по длине) необходима очень точная и стабильная скорость протяжки. Рекомендуется использовать автоматическую систему поддержания диаметра, поскольку ручная настройка может приводить к колебаниям толщины. Слишком высокая скорость протяжки чревата получением хрупкой тонкой нити, склонной к обрывам, а слишком низкая – излишне утолщенной мягкой нити, которую сложно ровно намотать. В обоих случаях страдает качество: вне допустимого диапазона диаметра затрудняется дальнейшая печать.

Качество и стабильность филамента PETG достигается балансом параметров. Необходимо соблюдение оптимальных температур по зонам экструзии для полной пластикации без термодеструкции, а также точная настройка скорости протяжки для удержания диаметра в пределах допуска. Дополнительно важно поддерживать стабильные внешние условия процесса: отсутствие сквозняков во избежание неравномерного охлаждения нити, постоянная комнатная температура окружающей среды, равномерную подачу гранул в бункер и чистоту материала. В нашем эксперименте выбранные оптимальные параметры позволили получить PETG-филамент диаметром $\sim 1,75$ мм с отклонениями не более $\pm 0,05$ мм, то есть соответствующий требованиям к качественному материалу для 3D-печати.

Заключение

В ходе выполнения выпускной квалификационной работы была разработана и собрана лабораторная экструзионная установка для производства полимерной нити диаметром $1,75 \pm 0,05$ мм, предназначенной для применения в 3D-принтерах, использующих технологию FDM/FFF. Конструкция установки ориентирована на работу с широким спектром термопластов, включая PETG, ABS, PLA и композитные материалы на их основе (PET-CF, ABS-CF).

Для реализации проекта был выполнен комплекс проектных и технологических мероприятий: проведён анализ аналогичных экструдеров, определены недостатки существующих решений, подобраны доступные комплектующие, разработаны и смоделированы ключевые узлы (модуль экструзии, система охлаждения, протяжки и намотки нити). Механическая часть устройства выполнена с применением лазерной резки, 3D-печати и сварки [6]. В конструкции использовались стандартные компоненты (шнековая пара, подшипники, планетарный редуктор, шаговые двигатели), что позволило удешевить изготовление и упростить обслуживание установки.

Разработан электронный блок управления на базе микроконтроллера ESP32 с применением твердотельных реле и датчиков температуры. Программное обеспечение устройства реализовано в среде Arduino IDE с поддержкой PID-регулирования нагрева, визуализации температурных и управляющих параметров через интерфейс GyverHub, а также функцией контроля протяжки и индикации состояния. Для трёх зон нагрева шнека и модуля охлаждения разработана электрическая принципиальная схема и выполнена сборка силовой части установки.

Были проведены испытания установки с экструзией филамента из PETG при различных температурных режимах и скоростях протяжки.

Полученные результаты подтвердили стабильность диаметра филамента (в пределах $\pm 0,05$ мм) и соответствие прочностных характеристик требованиям ГОСТ 11262-80.

Применение модульной архитектуры позволило учесть возможность последующей модернизации устройства — добавления измерительного лазерного модуля, расширения диапазона температур, адаптации к другим диаметрам филамента и интеграции с промышленными линиями.

Разработанный прототип продемонстрировал техническую реализуемость и функциональную гибкость, при этом стоимость его изготовления существенно ниже промышленных аналогов, что делает решение конкурентоспособным в условиях ограниченного бюджета.

Список используемой литературы

1. Desktop Filament Extruder MK1 by ARTME 3D [Электронный ресурс]. URL: <https://www.artme-3d.de/extruder-mk1-en/> (дата обращения: 25.05.2025).
1. [Product introduction] Wellzoom desktop filament extruder [Электронный ресурс]. URL: <https://www.tegakari.net/en/2023/08/wellzoom/> (дата обращения: 20.03.25)
2. . How to Export from Autodesk Inventor for SendCutSend [Электронный ресурс]. URL: https://sendcutsend.com/blog/export-from-autodesk-inventor/?srsltid=AfmBOooa5HUFUm8PGY-eNYYkeNp9nShi-BZwKcqTNaex2FEdeJessSoH&utm_source=chatgpt.com (дата обращения 23.03.25).
3. . Драгунов, Ю.Г. Марочник сталей и сплавов. 4-е изд., переработ. и доп. / Ю.Г. Драгунов, А.С. Зубченко, Ю.В. Каширский и др. Под общей ред. Ю.Г. Драгунова и А.С. Зубченко – М. : 2014. – 1216 с.
4. . Завгородний, В.К. Механизация и автоматизация переработки пластических масс: учебник / В.К. Завгородний. - 3-е изд., перераб. и доп. - М.: Машиностроение, 1970. - 596с.
5. . Ким, В.С. Оборудование заводов пластмасс / В.С. Ким, М.А. Шерышев. // учеб. пособие для академического – 2-е изд., испр. и доп. — М. : Издательство Юрайт, 2018. — 301 с.
6. . Кудрявцева, З.А. Проектирование производств по переработке пластмасс методом экструзии / З.А. Кудрявцева, Е.В. Ермолаева // Учеб. пособие к выполнению курсового и дипломного проектов – Владим. гос. унт. : Владимир, 2003. – 96 с.
7. . Литвинец, Ю.И. Технологические и энергетические расчёты при переработке полимеров экструзией / Ю.И. Литвинец. // Методические

указания к практическим занятиям, курсовому и дипломному проектированию – Екатеринбург, 2010. – 56 с.

8. . Оленев, Б.А. Проектирование производств литья под давлением для термопластов: учебник / Б.А. Оленев, Е.М. Мордкович, М.В.

Барышникова. - М.: Химия, 1985. - 342 с.

9. . Петин, В.А. Проекты с использованием контроллера Arduino / 3 е изд., перераб. и доп. – СПб.: ЮХВ-Петербург, 2019. –496 с.

10. . Рябинин, Д.Д. Смесительные машины для пластмасс и резиновых смесей / Д.Д. Рябинин, Ю.Е. Лукач – М.: Машиностроение, 1972. – 272 с.

11. . Сафиуллин Р.К. Основы автоматики и автоматизации процессов: учеб. пособ. / Р.К. Сафиуллин. – Казань: Изд-во Казанск. гос. архитектур.-строит. ун-та, 2013. – 187 с.

12. . Суханов, И.М. Технология получения крупногабаритных изделий из полиэтилена и других термопластов / И.М. Суханов и [др.] // Пластические массы. - 2006. - №7. – 342 с..

13. . Усольцев, А.А. Общая электротехника / А.А. Усольцев //Учебное пособие. – СПб: СПбГУ ИТМО, 2009. – 301 с.

14. . Шишковский, И.В. Основы аддитивных технологий высокого разрешения / И.В. Шишковский. – СПб.: Питер, 2016. – 400 с.

15. . Ярнольд, С. Arduino для начинающих: самый простой пошаговый самоучитель / Стюарт Ярнольд ; [пер. с англ. М. Райтман]. – Москва : Эксмо, 2017. – 256 с.

16. . Bouvier, J.-M. Extrusion Processing Technology / Jean-Marie Bouvier, Osvaldo H. Campanella // Wiley Blackwell, 2014. – 530 с.

17. . Gerrit Coetzee. Filament thickness sensors, what are they and what are they good for [Электронный ресурс]. URL: <https://hackaday.com/2016/02/05/filament-thickness-sensorswhat-are-they-and-what-are-they-good-for/> (дата обращения: 24.03.2025)

18. . Lafleur, P.G. Polymer extrusion / Pierre G. Lafleur, Bruno Vergnes // London. : ISTE Ltd, 2014. – 335 с.

19. . Rauwendaal, C. Polymer extrusion fourth edition / Chris Rauwendaal, Paul J. Gramann, Bruce A. Davis, Tim A. Osswald – Hanser Publications. : Munich, 2008. – 768 с.

Приложение А Структурная схема

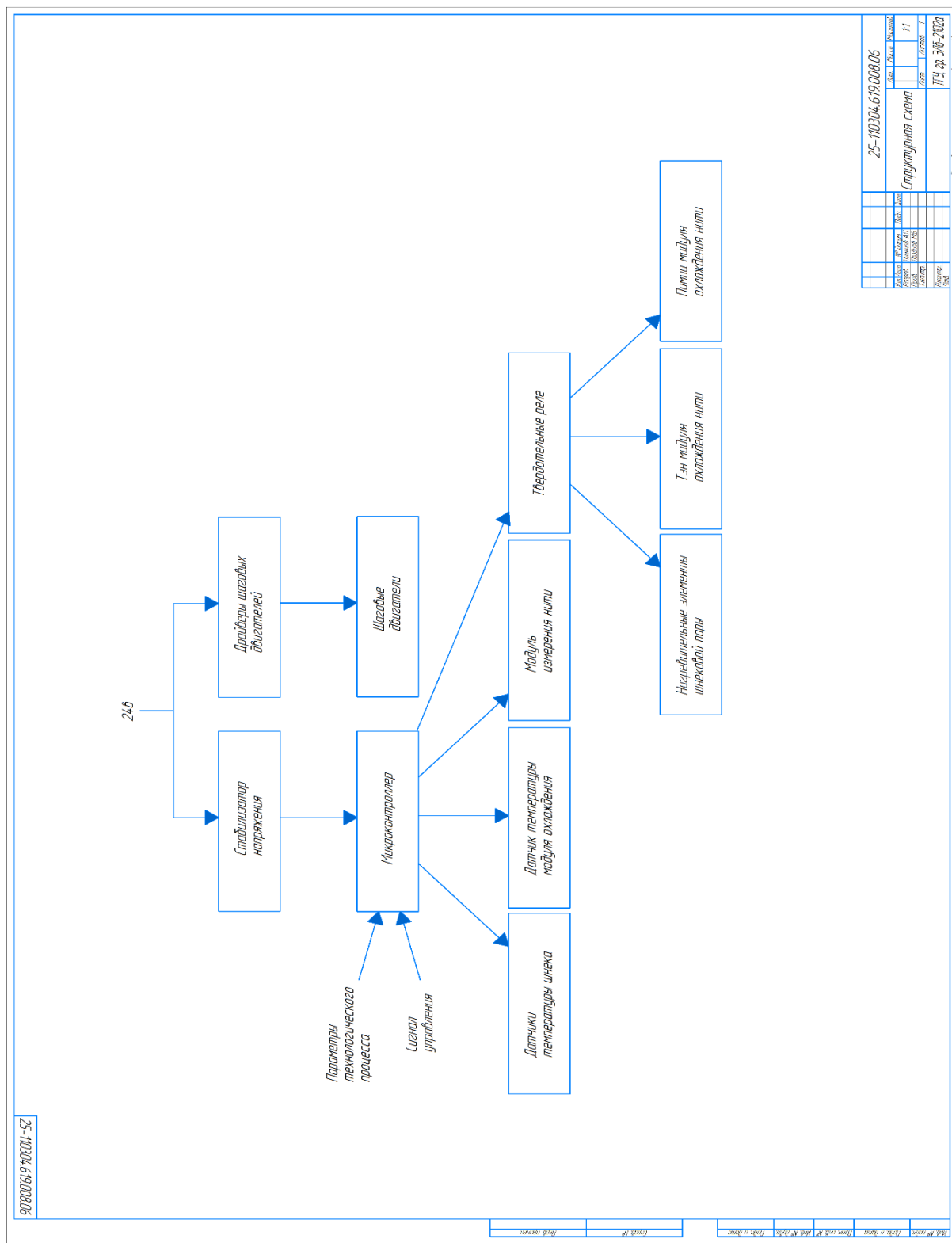


Рисунок А.1 – Структурная схема

Приложение Б Схема электрическая принципиальная

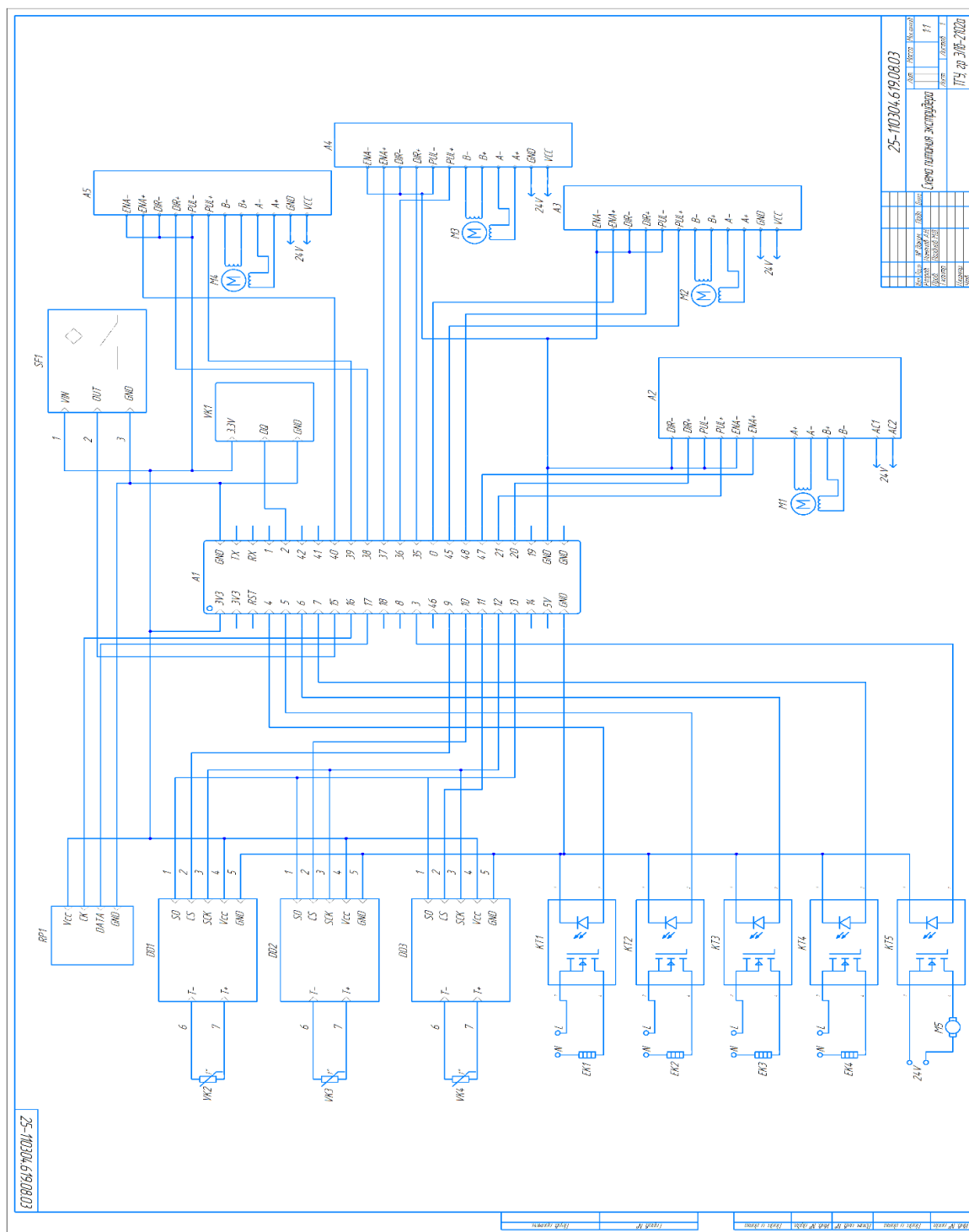


Рисунок Б.1 – Принципиальная схема