

Школа – Инженерная школа информационных технологий и робототехники
 Направление подготовки – 15.03.04 «Автоматизация технологических процессов и производств»
 Отделение (НОЦ) – Отделение автоматизации и робототехники

БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА

Тема работы
Система стабилизации диаметра полимерной нити экструзионной установки

УДК 681.513.1:677.5.017.224:678.027.3

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
8Т5Б	Власов Алексей Владимирович		

Руководитель ВКР

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОАР ИШИТР	Скороспешкин Максим Владимирович	К.Т.Н.		

Консультант

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Старший преподаватель ОАР ИШИТР	Тутов Иван Андреевич	—		

Нормоконтроль

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОАР ИШИТР	Суханов Алексей Викторович	К.Х.Н.		

КОНСУЛЬТАНТЫ ПО РАЗДЕЛАМ:

По разделу «Концепция стартап-проекта»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ШИП	Попова Светлана Николаевна	К.Э.Н.		

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ООД ШБИП	Винокурова Галина Федоровна	К.Т.Н.		

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Руководитель ООП	Громаков Евгений Иванович	К.Т.Н., доцент		
Руководитель ОАР ИШИТР	Леонов Сергей Владимирович	К.Т.Н.		

Томск – 2019 г.

ПЛАНИРУЕМЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ОБУЧЕНИЯ ПО ООП

Код результата	Результат обучения (выпускник должен быть готов)
<i>Профессиональные компетенции</i>	
P1	Обладать естественнонаучными и математическими знаниями для решения инженерных задач в области разработки, производства и эксплуатации систем управления техническими объектами и средств автоматизации.
P2	Обладать знаниями о передовом отечественном и зарубежном опыте в области управления техническими объектами с использованием вычислительной техники.
P3	Применять полученные знания (P1 и P2) для формулирования и решения инженерных задач при проектировании, производстве и эксплуатации современных систем управления техническими объектами и их составляющих с использованием передовых научно-технических знаний, достижений мирового уровня, современных инструментальных и программных средств.
P4	Уметь выбирать и применять соответствующие методы анализа и синтеза систем управления, методы расчета средств автоматизации, уметь выбирать и использовать подходящее программное обеспечение, техническое оборудование, приборы и оснащение для автоматизации и управления техническими объектами.
P5	Уметь находить электронные и литературные источники информации для решения задач по управлению техническими объектами.
P6	Уметь планировать и проводить эксперименты, обрабатывать данные и проводить моделирование с использованием вычислительной техники, использовать их результаты для ведения инновационной инженерной деятельности в области управления техническими объектами.
P7	Демонстрировать компетенции, связанные с инженерной деятельностью в области научно-исследовательских работ, проектирования и эксплуатации систем управления и средств автоматизации на предприятиях и организациях – потенциальных работодателей, а также готовность следовать их корпоративной культуре.
<i>Универсальные</i>	
P8	Владеть иностранным языком на уровне, позволяющем работать в интернациональной среде с пониманием культурных, языковых и социально - экономических различий.
P9	Эффективно работать индивидуально, в качестве члена и руководителя группы с ответственностью за риски и работу коллектива при решении инновационных инженерных задач в области автоматизации технологических процессов и производств, демонстрировать при этом готовность следовать профессиональной этике и нормам.
P10	Иметь широкую эрудицию, в том числе знание и понимание современных общественных и политических проблем, вопросов безопасности и охраны здоровья сотрудников, юридических аспектов, ответственности за инженерную деятельность, влияния инженерных решений на социальный контекст и окружающую среду
P11	Понимать необходимость и уметь самостоятельно учиться и повышать квалификацию в течение всего периода профессиональной деятельности.

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
 федеральное государственное автономное
 образовательное учреждение высшего образования
 «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» (ТПУ)

Школа – Инженерная школа информационных технологий и робототехники
 Направление подготовки – 15.03.04 «Автоматизация технологических процессов и производств»

Уровень образования – Бакалавриат

Отделение (НОЦ) – Отделение автоматизации и робототехники

Период выполнения – осенний / весенний семестр 2018 /2019 учебного года

Форма представления работы:

бакалаврская работа

(бакалаврская работа, дипломный проект/работа, магистерская диссертация)

КАЛЕНДАРНЫЙ РЕЙТИНГ-ПЛАН выполнения выпускной квалификационной работы

Срок сдачи студентом выполненной работы:	
--	--

Дата контроля	Название раздела (модуля) / вид работы (исследования)	Максимальный балл раздела (модуля)
	Основная часть	75
	Концепция стартап-проекта	15
	Социальная ответственность	10

СОСТАВИЛ:

Руководитель ВКР

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОАР ИШИТР	Скороспешкин Максим Владимирович	к.т.н.		

Консультант

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Старший преподаватель ОАР ИШИТР	Тутов Иван Андреевич	—		

СОГЛАСОВАНО:

Руководитель ООП

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОАР ИШИТР	Громаков Евгений Иванович	к.т.н., доцент		

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
 федеральное государственное автономное
 образовательное учреждение высшего образования
 «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» (ТПУ)

Школа – Инженерная школа информационных технологий и робототехники
 Направление подготовки – 15.03.04 «Автоматизация технологических процессов и производств»
 Отделение (НОЦ) – Отделение автоматизации и робототехники

УТВЕРЖДАЮ:
 Руководитель ООП
 _____ Громаков Е.И.
 (Подпись) (Дата) (Ф.И.О.)

ЗАДАНИЕ на выполнение выпускной квалификационной работы

В форме:

бакалаврской работы

(бакалаврской работы, дипломного проекта/работы, магистерской диссертации)

Студенту:

Группа	ФИО
8Т5Б	Власову Алексею Владимировичу

Тема работы:

Система стабилизации диаметра полимерной нити экструзионной установки	
Утверждена приказом директора (дата, номер)	№3489/с от 06.05.2019

Срок сдачи студентом выполненной работы:	
--	--

ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:

Исходные данные к работе <i>(наименование объекта исследования или проектирования; производительность или нагрузка; режим работы (непрерывный, периодический, циклический и т. д.); вид сырья или материал изделия; требования к продукту, изделию или процессу; особые требования к особенностям функционирования (эксплуатации) объекта или изделия в плане безопасности эксплуатации, влияния на окружающую среду, энергозатратам; экономический анализ и т. д.).</i>	Объект управления: диаметр полимерной нить на выходе экструзионной установки. Цель работы: повышение качества полимерной нити при ее производстве.
--	---

Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов <i>(аналитический обзор по литературным источникам с целью выяснения достижений мировой науки техники в рассматриваемой области; постановка задачи исследования, проектирования, конструирования; содержание процедуры исследования, проектирования, конструирования; обсуждение результатов выполненной работы; наименование дополнительных разделов, подлежащих разработке; заключение по работе).</i>	• Определение технического задания на разработку решения реализации СУ; • обзор имеющихся технологий 3D-печати, требований к расходному материалу; • определение способа повышения качества полимерной нити; • описание системы стабилизации; • разработка прототипа системы; • получение экспериментальных данных для определения математической модели системы; • настройка регуляторов системы.
Перечень графического материала <i>(с точным указанием обязательных чертежей)</i>	• Листинг программы.
Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы <i>(с указанием разделов)</i>	
Раздел	Консультант
Концепция стартап-проекта	Попова Светлана Николаевна
Социальная ответственность	Винокурова Галина Федоровна
Названия разделов, которые должны быть написаны на русском и иностранном языках:	
Заключение	

Дата выдачи задания на выполнение выпускной квалификационной работы по линейному графику	
--	--

Задание выдал руководитель / консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОАР ИШИТР	Скороспешкин Максим Владимирович	к.т.н.		
Старший преподаватель ОАР ИШИТР	Тутов Иван Андреевич	—		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
8Т5Б	Власов Алексей Владимирович		

ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА «КОНЦЕПЦИЯ СТАРТАП-ПРОЕКТА»

Студенту:

Группа	ФИО
8Т5Б	Власову Алексею Владимировичу

Школа	ИИШТР	Отделение (НОЦ)	ОАР
Уровень образования	Бакалавриат	Направление/специальность	15.03.04 «Автоматизация технологических процессов и производств»

Перечень вопросов, подлежащих разработке:	
Проблема конечного потребителя, которую решает продукт, который создается в результате выполнения НИОКР	Повышение качества полимерной нити при ее производстве для эксплуатации в 3D-печати.
Способы защиты интеллектуальной собственности	Коммерческая тайна, патентование.
Объем и емкость рынка	Объем российского рынка: (100 – 120) млн. рублей РФ. Объем мирового рынка: 1,3 млрд. долларов США.
Современное состояние и перспективы отрасли, к которой принадлежит представленный в ВКР продукт	Высокие темпы роста объемов продаж полимерной нити рынка 3D-печати с каждым годом.
Себестоимость продукта	CAPEX (капитальные затраты) 785 тыс. рублей., себестоимость от 300 до 500 рублей за 1 кг продукта.
Конкурентные преимущества создаваемого продукта	Высокая точность изготовления полимерной нити, снижение объемов брака, низкая цена, высокая доступность.
Сравнение технико-экономических характеристик продукта с отечественными аналогами	На основании конкурентных преимуществ.
Целевые сегменты потребителей продукта	Бытовое применение, архитектура, реклама, образование, машиностроение, медицина; ювелирная промышленность; изготовление оптоволоконных линий.
Бизнес-модель проекта	Модель по А. Остервальдеру и И. Пинье.
Производственный план	Увеличивающийся, начиная с 368 катушек за первый квартал.
План продаж	На условиях партнерства с компанией Bestfilament.
Перечень графического материала:	
При необходимости представить эскизные графические материалы	Модель по А. Остервальдеру и И. Пинье, таблицы расчета бюджета проекта.

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику	
--	--

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ШИП	Попова Светлана Николаевна	к.э.н., доцент		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
8Т5Б	Власов Алексей Владимирович		

ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА «СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»

Студенту:

Группа	ФИО
8Т5Б	Власову Алексею Владимировичу

Школа	ИШИТР	Отделение (НОЦ)	ОАР
Уровень образования	Бакалавриат	Направление/специальность	15.03.04 «Автоматизация технологических процессов и производств»

Тема ВКР:

Система стабилизации диаметра полимерной нити экструзионной установки	
Исходные данные к разделу «Социальная ответственность»:	
1. Характеристика объекта исследования (вещество, материал, прибор, алгоритм, методика, рабочая зона) и области его применения	Объектом исследования и разработки является система стабилизации диаметра полимерной нити путем регулирования частотой вращения двигателя-намотчика при отклонении от заданного значения. В состав системы входят: лазер, оптическая система, фотодиодная линейка, микроконтроллер. Рабочим местом является зона, включающая рабочий стол, персональный компьютер, оборудование контроля и настройки разрабатываемой системы. На производственном участке по месту расположения оборудования. Областью применения данной системы является оборудование на предприятии по производству высококачественной полимерной нити для 3D-печати.
Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:	
1. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности: • специальные правовые нормы трудового законодательства; • организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны.	• ТК РФ; • СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03; • ГОСТ 12.2.032-78 ССБТ.
2. Производственная безопасность: 2.1. Анализ выявленных вредных и опасных факторов 2.2. Обоснование мероприятий по снижению воздействия	2.1. Вредные и опасные факторы: • выделение вредных химических веществ; • уровень шума; • лазерное излучение; • факторы, связанные с электрическим током; • физические статические перегрузки; • нервно-психические перегрузки, вызванные умственным перенапряжением и перенапряжением анализаторов. 2.2. Описание возможных мероприятий по снижению воздействия вредных факторов на организм и окружающую среду.
3. Экологическая безопасность:	Воздействие объекта на атмосферу: при расплавлении полимерных материалов в экструзионной установке, при пайке компонентов выделяются вредные вещества. Устройство управления вредного воздействия не оказывает. Воздействие объекта на гидросферу: не происходит.

	Воздействие объекта на литосферу: утилизация электротехнических компонентов при изготовлении системы.
4. Безопасность в чрезвычайных ситуациях:	Среди возможных ЧС при разработке и эксплуатации проектируемого решения является возникновение пожара.

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику	
---	--

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ООД ШБИП	Винокурова Галина Федоровна	к.т.н., доцент		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
8Т5Б	Власов Алексей Владимирович		

Реферат

Пояснительная записка выпускной квалификационной работы содержит 91 страницу текста, 34 рисунка, 20 таблиц, 1 приложение.

Цель работы заключается в повышении качества полимерной нити при ее производстве. Разработка и создание устройства системы стабилизации диаметра полимерной нити и отслеживания ее провисания являются задачами для достижения цели. Объектом исследования является изучение и настройка системы регулирования данного устройства.

Метод проведения исследования состоит в получении экспериментальных данных с датчика при помощи разрабатываемой установки с последующей обработкой с использованием программы математического моделирования Matlab Simulink для дальнейшей отладки системы стабилизации.

Новизна заключается во внедрении системы стабилизации диаметра при производстве полимерной нити.

Основными технологическими особенностями является измерение диаметра и провисания полимерной нити при помощи фотодиодной линейки, управление системой на базе платы с микроконтроллером AVR Atmega328P-PU.

В результате получена модель устройства, измеряющая провисание и диаметр полимерной нити, выбраны и настроены контуры стабилизации провисания и диаметра полимерной нити.

Областью применения является экструдер по изготовлению полимерной нити для 3D-печати, в дальнейшем после отладки системы предполагается охватить рынок телекоммуникаций для использования системы при производстве оптоволоконных нитей.

Разработка позволяет снижать расходы материала при производстве, увеличивать ее производительность, повышать качество продукции.

Далее представлен перечень ключевых слов:

3D-ПЕЧАТЬ, ПОЛИМЕРНАЯ НИТЬ, ЭКСТРУДЕР, ДИАМЕТР, СИСТЕМА АВТОМАТИЗИРОВАННОГО УПРАВЛЕНИЯ, ПИД-РЕГУЛЯТОР.

Определения, обозначения, сокращения

В данной работе применены следующие термины с соответствующими определениями:

фильера: Форма с высокой степенью прочности, через которую продавливается пластичный материал;

экструдер, или экструзионная установка: Устройство для переработки входного сырья путем измельчения его через шнек с последующим нагревом и выдавливанием продукта через фильеру;

3D-печать: Изготовление объектов в пространстве (трехмерное изготовление), используя их цифровую модель.

В данной работе применены следующие сокращения:

ABS (акрилонитрилбутадиенстирол) – ударопрочная техническая термопластическая смола;

PLA (полилактид) – биоразлагаемый, биосовместимый, термопластичный, алифатический полиэфир, мономером которого является молочная кислота;

ОУ – объект управления;

ПО – программное обеспечение;

ПП – переходный процесс;

ПФ – передаточная функция;

САПР – система автоматизированного проектирования;

СУ – система управления;

ШИМ – широтно-импульсная модуляция.

Оглавление

Введение.....	14
1 Литературный обзор	16
1.1 Технологии печати трехмерных объектов	16
1.2 Требования к расходному материалу для 3D-печати	19
1.3 Экструзионная установка и ее особенность.....	20
1.4 Технология стабилизации диаметра продукта при изготовлении	20
2 Техническое задание.....	23
2.1 Цели и задачи разрабатываемого решения	23
2.2 Назначение системы стабилизации	23
2.3 Аппаратная часть	24
2.4 Программная часть	24
3 Основная часть	25
3.1 Описание проектируемого решения	25
3.2 Компонентная база	27
3.2.1 Основной датчик системы	27
3.2.2 Плата для вычислительного обеспечения системы управления. 29	
3.2.3 Лазерное оборудование	29
3.2.4 Экструзионная установка.....	30
3.2.5 Дополнительное оборудование	31
3.3 Проектирование и изготовление каркаса устройства для системы	32
3.4 Подключение и настройка датчика.....	33

3.5	Проведение экспериментов	34
3.6	Определение математической модели системы стабилизации провисания нити (внутреннего контура)	35
3.7	Ввод и настройка регулятора внутреннего контура	40
3.8	Определение математической модели системы стабилизации диаметра нити (внешнего контура)	45
3.9	Ввод и настройка регулятора внешнего контура	51
4	Концепция стартап-проекта	56
4.1	Название.....	56
4.2	Описание продукта как Результата НИР	56
4.3	Интеллектуальная собственность	58
4.4	Объем и емкость рынка.....	58
4.5	Анализ современного состояния и перспектив развития отрасли	61
4.6	Планируемая стоимость продукта	62
4.7	Конкурентные преимущества создаваемого продукта, сравнение технико-экономических характеристик с отечественными и мировыми аналогами	67
4.8	Целевые сегменты потребителей	68
4.9	Бизнес-модель проекта. Производственный план и план продаж	69
4.10	Стратегия продвижения продукта на рынок.....	71
5	Социальная ответственность	72
5.1	Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности	72
5.2	Производственная безопасность	75

5.2.1	Выделение вредных веществ	76
5.2.2	Повышенный уровень шума	76
5.2.3	Лазерное излучение	77
5.2.4	Поражение электрическим током	78
5.2.5	Физические статические перегрузки	78
5.2.6	Нервно-психические перегрузки.....	79
5.3	Экологическая безопасность	79
5.4	Безопасность в чрезвычайных ситуациях	80
	Вывод по разделу	82
	Заключение	83
	Conclusion	84
	Список использованных источников	85
	Приложение А Листинг программы	90

Введение

В настоящее время имеется тенденция внедрять в разные области человеческой деятельности технологии 3D-печати различных объектов. Чем бы они ни были: сувениром, изделием для домашнего предназначения, моделью при разработке новой обтекаемой формы автомобиля, моделью космического аппарата или же внутренними органами для человека, – все это делается для получения новых решений, увеличения скорости изготовления от концепта до конечной модели, повышения качества конечного продукта, упрощения процесса разработки и даже его удешевления.

В качестве наиболее распространенного материала при 3D-печати выступают полимерные нити, которые являются расходным компонентом для принтеров. Сами принтеры для 3D-печати бывают разных размеров, конструкции, и главными недостатками и проблемами при эксплуатации принтеров наплавки являются неравномерный выход материала и засорение печатающей головки (сопла). Это приводит к неоднородности поверхности изделия, изменению его формы и свойств, также может и вовсе прерваться процесс печати. Для предотвращения данного факта требуется повышать качество полимерной нити. Главным параметром выступает диаметр нити, и чем стабильней он будет, соответствуя требованиям принтера, тем выше качество готового продукта на выходе, ниже расходы при производстве, выше производительность.

Целью данной работы является повышение качества полимерной нити при ее производстве. Глобальными задачами для достижения цели стали разработка и создание устройства системы стабилизации диаметра полимерной нити с отслеживанием ее диаметра на выходе экструзионной установки. Особенностью работы является проведение экспериментов, применение практических навыков в реализации программной и аппаратной части исследования. Данное внедрение позволит снизить количество брака, получаемого на выходе экструзионной установки, также уменьшится расход

сырья при изготовлении продукта благодаря его наиболее эффективному использованию.

Похожие системы существуют в очень ограниченном количестве, а стоимость у конкурентов слишком высока. Это связано с тем, что отрасль 3D-печати находится в стадии развития и совершенствования, данный проект является в достаточной степени актуальным.

1 Литературный обзор

1.1 Технологии печати трехмерных объектов

Технология производства трехмерных объектов появилась еще в 80-х годах XX века. Основателем данной технологии считается Чарльз Халл, который предложил идею использовать эпоксидную смолу, нанося ее послойно. При помощи ультрафиолета происходило затвердевание модели. Данная технология в настоящее время широко распространена и называется стереолитографией (SLA от англ. Stereolithography) [2].

Другой похожей технологией на основе затвердевания под ультрафиолетом является технология цифровой светодиодной проекции (DLP от англ. Digital Light Processing). Отличие заключается в том, что в SLA используется система: лазер, линзы, зеркало, - пучок света от лазера направляется в заданное положение и, засвечивая материал, полимеризует его в каждой точке объекта. При этом используемый расходный материал – жидкий фотополимер, находится в емкости с прозрачным дном, на которую и попадает луч света. В технологии DLP имеется проектор, который воспроизводит картинку каждого слоя объекта на дно емкости с жидким фотополимером. Происходит полимеризация слоя, затем объект поднимается и повторяется процесс затвердевания следующего слоя [3]. На рисунках 1 и 2 представлены схемы печати технологиями SLA и DLP соответственно.

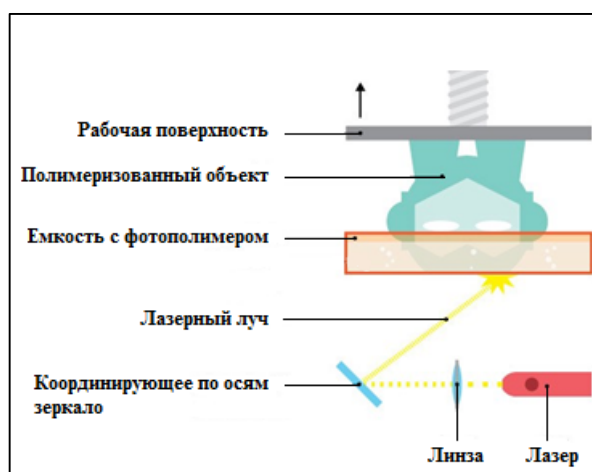


Рисунок 1 – Схема 3D-печати по технологии SLA

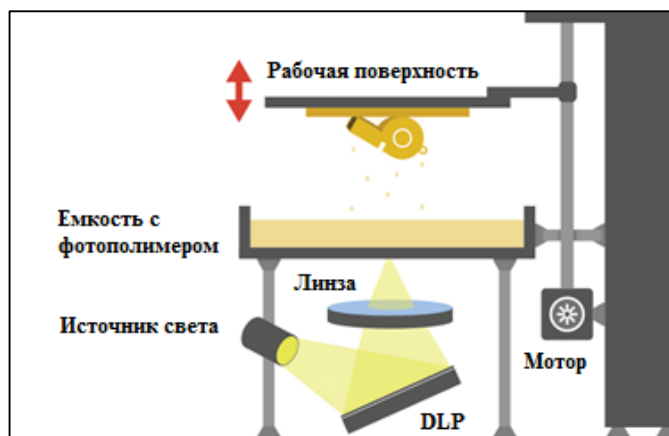


Рисунок 2 – Схема 3D-печати по технологии DLP

К концу 80-х годов появляется технология печати путем последовательного нанесения слоев размягченного термопластика (FDM от англ. Fused deposition modeling). Термопластик в затвердевшем виде подается в печатающую головку 3D-принтера, где разогревается и выдавливается через фильеру определенных размеров. Печатающая головка, или «хот энд», позиционируется в рабочей области и наносит разогретый материал согласно 3D-модели объекта, заложенной в программе принтера. По мере охлаждения пластика модель затвердевает [4]. На рисунке 3 представлена схема печати по данной технологии.

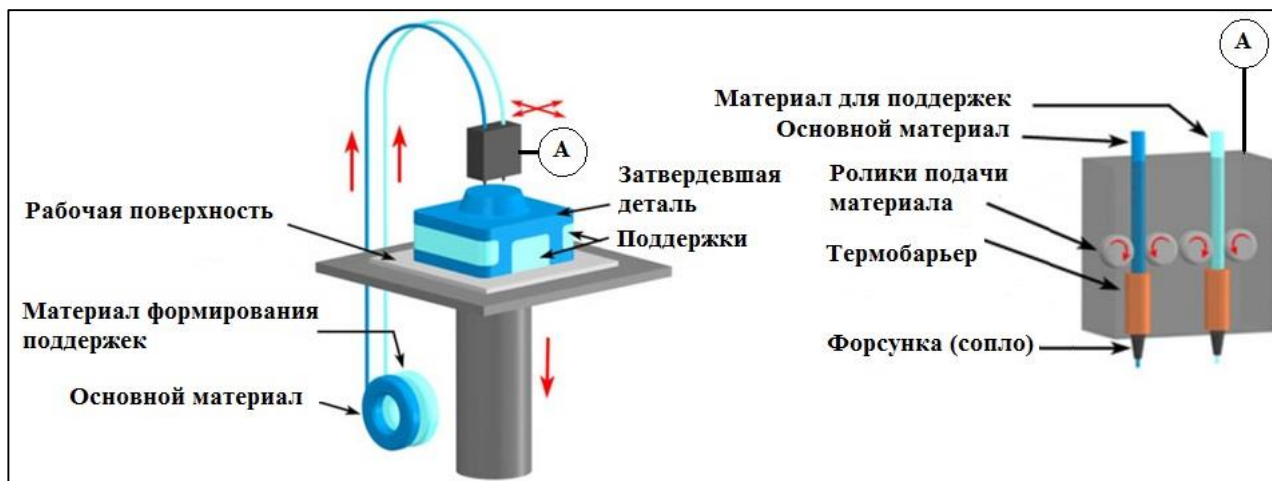


Рисунок 3 – Схема 3D-печати по технологии FDM

Были представлены самые распространенные способы печати трехмерных объектов из пластика.

Существуют также и другие методы с использованием различных материалов, которые сведены в таблице 1 [24].

Таблица 1 – Технологии 3D-печати

Метод	Технология	Используемые материалы
Экструзионный	Моделирование методом послойного наплавления (FDM или FFF)	Термопластики (PLA, ABS и др.)
Проволочный	Производство произвольных форм электронно-лучевой плавкой (EBF ₃)	Практически любые металлические сплавы
Порошковый	Прямое лазерное спекание металлов (DMLS)	Практически любые металлические сплавы
	Электронно-лучевая плавка (EBM)	Титановые сплавы
	Выборочная лазерная плавка (SLM)	Титановые сплавы, кобальт-хромовые сплавы, нержавеющая сталь, алюминий
	Выборочное тепловое спекание (SHS)	Порошковые термопластики
	Выборочное лазерное спекание (SLS)	Термопластики, металлические порошки, керамические порошки
Струйный	Струйная трехмерная печать (3DP)	Гипс, пластики, металлические порошки, песчаные смеси
Ламинирование	Изготовление объектов методом ламинирования (LOM)	Бумага, металлическая фольга, пластиковая пленка
Полимеризация	Стереолитография (SLA)	Фотополимеры
	Цифровая светодиодная проекция (DLP)	

В работе рассматривается система стабилизации диаметра полимерной нити для использования в 3D-печати по технологии FDM. Особенно актуально это в связи с тем, что такой метод печати простой, дешевый и достаточно распространенный, но точность готовых изделий ниже, по сравнению с теми же объектами, изготовленных при помощи методов SLA или DLP.

Недостатком данного метода печати является снижение ее качества, засорение печатающих головок принтеров при использовании расходных материалов с пониженными показателями точности.

1.2 Требования к расходному материалу для 3D-печати

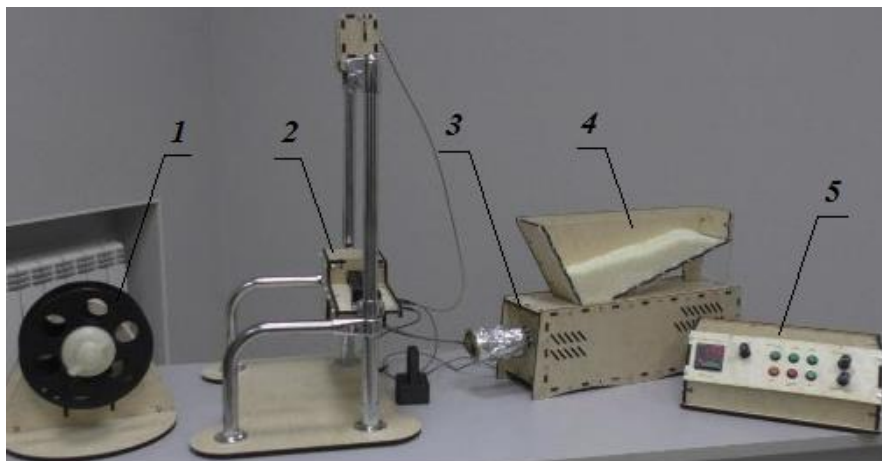
Рассматривая технологию печати FDM, расходным материалом является полимерная нить, выполненная из разных материалов. В основном это ABS, PLA материалы [2]. Основные показатели – это материал, диаметр и цвет. Цвет не играет существенной роли в качестве печати и зависит от красителей, добавляемых при производстве. Такой параметр, как диаметр окружности в сечении полимерной нити, является объектом исследования, для стабилизации которой и разрабатывается система. Стандартное значение – 1,75 мм, или 2,85 мм, что используется значительно реже. Значение указано без погрешности, которого не избежать при производстве, стандартов в данной сфере не отмечено. Так полимерная нить может быть изготовлена и в одной катушке быть в диаметре как 1,50 мм, так и 1,90 мм, при заявленных 1,75 мм, что негативно скажется при использовании ее в 3D-печати. Подробные расчеты зависимости объема напечатанного материала от диаметра полимерной нити указаны в разделе № 4.2 настоящей работы.

Производители полимерной нити стараются изготавливать нить с точностью порядка 50 микрон. Такой российский производитель, как Bestfilament, показывает высокие показатели на фоне других производителей, устанавливая точность порядка (20 – 30) микрон на катушку [5]. Но даже такие погрешности могут привести к неудовлетворительным результатам.

Для повышения результатов качества изделий и снижения расхода материала при печати деталей и производстве полимерной нити разрабатывается система контроля за точностью и стабилизации в диаметре полимерной нити при ее производстве.

1.3 Экструзионная установка и ее особенность

Производят полимерную нить на экструзионных установках. На рисунке 4 представлен внешний вид мобильного экструдера и его компоненты производства Bestfilament [5].



1 – катушка с затвердевшей полимерной нитью; 2 – двигатель-намотчик; 3 – экструдер; 4 – емкость для загрузки полимерных гранул, сырья; 5 – пульт управления экструдером

Рисунок 4 – Мобильный экструдер

В данном случае рассматривается такой экструдер, так как он применяется при разработке системы стабилизации диаметра полимерной нити. Однако экструдеры могут быть и не только мобильные, но и промышленные, которые отличаются габаритами, объемами производства, точностью изготавливаемой полимерной нити, что является особенностью каждого экструдера. Она определяется в процессе затвердевания нити с момента выдавливания ее из фильеры.

1.4 Технология стабилизации диаметра продукта при изготовлении

Измерение диаметра полимерной нити может быть различным. В таблице 2 сведены основные способы [6].

Таблица 2 – Способы измерения диаметра нити

Тип способа	Преимущества	Недостатки
Механический с использованием ручного инструмента (контактный), например, штангенциркуль, микрометр.	Метод дешевый, быстрый при однократных измерениях.	Высокая погрешность измерений, низкая скорость при многократных измерениях.
Пневматические (контактный/бесконтактный)	Возможность использования метода в тех случаях, где другие невозможны.	Невысокая точность, сложность конструкции.
Оптические (бесконтактный), например, лазерные приборы.	Относительно простая реализация, высокая точность, отсутствие контакта с измеряемым объектом.	Невозможность применения в среде, где прохождение оптического луча затруднено.
Электрические (бесконтактный), например, индуктивные приборы.	Высокая точность и скорость измерения.	Высокая цена, измерение возможно для металлических объектов

Определение диаметра полимерной нити часто производится по факту ее изготовления механическими методами, то есть отсутствует непрерывный контроль в процессе изготовления.

Непосредственное влияние на диаметр при производстве нити на экструдере производства Bestfilament обеспечивается при использовании оптопары – оптического прибора, отслеживающего достижения определенного положения полимерной нити относительно фильеры экструдера, и управлением двигателем-намотчиком, изменяющего это положение, создавая влияние на саму нить и ее диаметр.

Непрерывное измерение диаметра и ее стабилизация в пределах 50 микрон была выявлена у производителя 3Devo на экструзионной установке, в которой используется оптический сенсор [7]. Сложная конструкция и высокая стоимость готового оборудования является недостатком, а точность не выше, чем у экструдеров без данной системы непосредственного контроля.

Эффективность оптического метода измерения диаметра высокая, ввиду отсутствия физического контакта с материалом и возможности создания

управляющего воздействия при формировании готовой нити на этапе полимеризации (нить пластична) непрерывно при ее производстве.

2 Техническое задание

2.1 Цели и задачи разрабатываемого решения

Цель разрабатываемого решения заключается в создании системы на базе компактного устройства, обеспечивающей отслеживание и стабилизацию диаметра полимерной нити путем регулирования провисания при помощи управления двигателем-намотчиком экструзионной установки.

Для достижения цели были выделены следующие задачи.

1. Изучение технологических решений.
2. Выбор компонентов для устройства.
3. Сборка устройства.
4. Написание программного обеспечения для работы датчика.
5. Проведение экспериментов определения зависимости провисания нити при воздействии двигателя намотчика, а также изменения диаметра полимерной нити при ее провисании.
6. Нахождение математической модели ОУ согласно полученным данным.
7. Определения типа внедряемого регулятора. Синтез регулятора.
8. Проведение экспериментов по определению соответствия реальных данных расчетным математическим, а значит соответствия требованиям по работе автоматизированной системы.

2.2 Назначение системы стабилизации

Система предназначена для совершенствования оборудования технологического процесса производства полимерной нити для 3D-печати. Подразумевается, что система, обеспечивая высокую точность в диаметре полимерной нити (заявленная погрешность не более $\pm 0,01$ мм; на рынке предлагаются решения, в среднем, с точностью $\pm 0,05$ мм), снижает количество дефектов при 3D-печати при использовании по назначению, уменьшаются

объемы брака при изготовлении, количество остановок оборудования и тем самым повышается производительность процесса производства нити.

2.3 Аппаратная часть

Использование платы Arduino на базе микроконтроллера AVR Atmega328P-PU для реализации системы управления, как наиболее простой и дешевой на этапе разработки.

Датчик для определения диаметра и положения полимерной нити в процессе управления.

Двигатель-намотчик — часть системы экструзионной установки для создания воздействия на полимерный материал на стадии производства при его окончательном формировании.

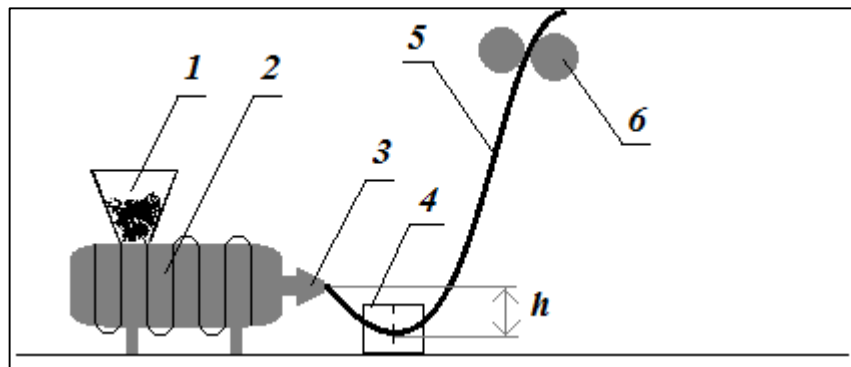
2.4 Программная часть

ПО для определения диаметра полимерной нити в режиме реального времени с одновременным отслеживанием положения нити относительно компонентов экструзионной системы. Создание функционального ПИД-регулятора на базе микроконтроллера для обеспечения системы стабилизации диаметра нити.

3 Основная часть

3.1 Описание проектируемого решения

Подробно процесс изготовления полимерной нити и формирование ее диаметра до внедрения системы стабилизации описан ниже, а на рисунке 5 представлена схема системы.



1 – бункер для полимерных гранул; 2 – экструзионная установка; 3 – фильера; 4 – оптопара и устройство для отслеживания диаметра и провисания полимерной нити; 5 – полимерная нить; 6 – ролики двигателя-намотчика

Рисунок 5 – Процесс изготовления полимерной нити

Полимерные гранулы, сырье для изготовления нити, находятся в бункере. При изготовлении полимерной нити на выходе экструзионной установки из фильеры нить находится в пластичном состоянии, очень гибкая, значительно подвержена воздействию на ее форму, в следствие ее нагрева. Так нить после прохождения фильеры экструдера имеет определенную форму в виде окружности с диаметром, в нашем случае, 1,75 мм. Далее нить естественно охлаждается, затягивается при помощи роликов намотчика, после которого уже принимает окончательную форму. Момент нахождения нити от фильеры до намотчика является определяющим при формировании полимерной нити. В силу воздействия намотчика, пока нить не затвердела, происходит изменение ее диаметра, так как имеется растяжение продукта под собственным весом. Чтобы его регулировать, в систему при производстве закладывается провисание (h) на этом участке, которое воздействует на диаметр под управлением двигателя-намотчика путем изменения уровня (h). Провисание определялось электронным

прибором – оптопарой, которая фиксирует положение нити выше или ниже светового луча прибора, подавая сигнал двигателю-намотчику на затягивание нити или ожидание. В виду отсутствия непосредственного контроля диаметра при этом процессе возникают скачкообразные движения продукта, диаметр имеет волнообразную форму.

Предложение непосредственной стабилизации диаметра стало необходимостью для избегания недопустимой формы готового продукта.

С технической точки зрения работы системы и для проведения экспериментов выделено два контура. Так как имеется зависимость значения диаметра от провисания нити, контуры включаются каскадно (рисунок 6), а процесс стабилизации планируется обеспечить на уровне с погрешностью не более $\pm 0,01$ мм. Такая точность позволит снизить дефекты печати, а печатающая головка не будет подвержена засорению.

Внешний контур будет отслеживать диаметр нити и регулировать это значение, внутренний – провисание (h). Для этого вместо оптопары (4) устанавливается фотодиодная линейка-датчик.

На рисунке 6 представлена схема системы стабилизации диаметра полимерной нити.

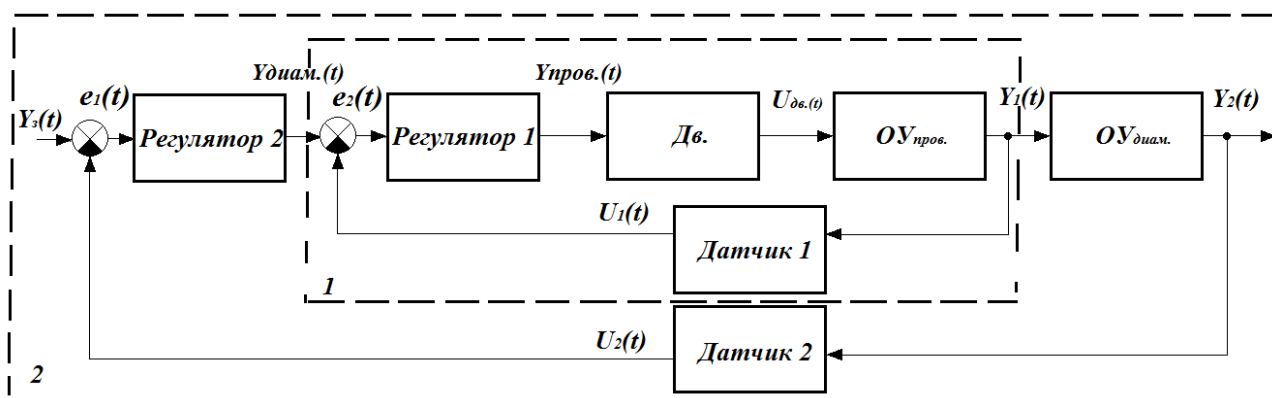


Рисунок 6 – Система стабилизации диаметра полимерной нити при производстве

Задание значения диаметра полимерной нити $Y_3(t)$ поступает на вход системы во внешний контур. В сумматоре вычисление отклонения (ошибки рассогласования) $e_1(t)$ фактического значения $U_2(t)$ с Датчика 2 (измерение

диаметра) от заданного $Y_3(t)$. Вычисленное значение отклонения поступает в Регулятор 2, который, используя необходимые, в соответствии с $e_1(t)$ алгоритмы, вырабатывает управляющее воздействие $Y_{\text{диам.}}(t)$. Это воздействие является задающим сигналом для внутреннего контура. Ошибка рассогласования $e_2(t)$ – результат вычисления разности между $Y_{\text{диам.}}(t)$ и $U_1(t)$ с Датчика 1 (измерение положения) – является входным сигналом для Регулятора 1. Тот в свою очередь также вырабатывает необходимый управляющий сигнал $Y_{\text{пров.}}(t)$ на двигатель-намотчик Дв., который воздействует на полимерную нить и ее положение $OY_{\text{пров.}}$. Положение нити относительно экструдера $Y_1(t)$, или сигнал с $OY_{\text{пров.}}$, поступает на Датчик 1 в обратной связи, а также влияет на сам диаметр $OY_{\text{диам.}}$. Значение диаметра $Y_2(t)$ является выходной переменной системы стабилизации, также данный сигнал идет на Датчик 2 для определения числового значения при вычислении ошибки.

Регуляторы, воздействуя на ОУ, уменьшают ошибки рассогласования, и при точной их настройке, $e_1(t)$ и $e_2(t)$ стремятся к нулю. Это значит, что на выходе системы обеспечивается стабильный диаметр полимерной нити с высокой точностью при ее производстве. Однако стоит учитывать, что высокая точность зависит еще от таких факторов, как возможность датчика при измерении диаметра, также внешнее воздействие на систему.

3.2 Компонентная база

3.2.1 Основной датчик системы

Для измерения диаметра и провисания нити, которая в процессе изготовления находится в размягченном состоянии, воздействие контактными измерительными приборами недопустимо. Использование бесконтактного метода является предпочтительным, где электрический (индуктивный) метод не подходит в силу неметаллической природы полимерной нити. Оптический с использованием лазерного прибора является оптимальным.

Для реализации данного метода используется фотодиодный датчик – TSL1401-DB (на рисунке 7 показан общий вид платы с датчиком (1)), построенного на базе матрицы из 128 фотодиодов, схемы со встроенным усилителем сигнала и функцией хранения данных каждого пикселя, которая обеспечивает время начала и окончания одновременного интегрирования значений на всех пикселях.

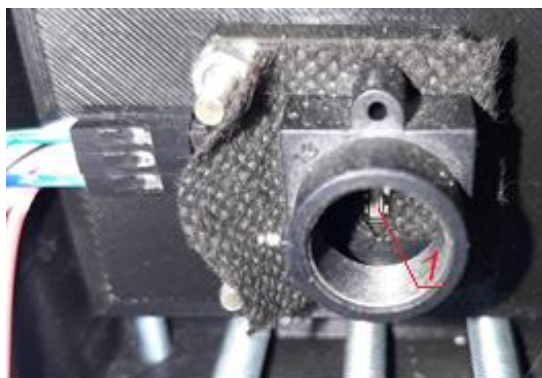


Рисунок 7 – Общий вид платы с датчиком TSL1401

Для проектируемого решения датчик служит для определение засвеченных пикселей, преобразование сигнала с которых в привычный для человека вид значения диаметра и положения полимерной нити возможно при помощи ПО.

Основные технические характеристики сведены в таблицу 3 [8].

Таблица 3 – Технические характеристики платы с линейкой TSL1401

Параметр	Значение
Напряжение питания, В	(3 – 5)
Частота работы, МГц	До 8
Количество пикселей, шт	128
Плотность пикселей, пикс/дюйм	400
Расстояние между пикселями, мкм	8

3.2.2 Плата для вычислительного обеспечения системы управления

В качестве платы, которая будет объединять аппаратные части системы в единый модуль, обеспечивать подачу сигналов для управления процессом выбрана наиболее распространенная для обучения и создания несложных систем плата Arduino Uno на базе микроконтроллера AVR Atmega328P-PU. Данная плата подходит в силу ее ключевых особенностей, рассмотренных ниже [9].

1. Широкий диапазон питания платы: (7 – 12) В (рекомендованный), - удобство подключения к внешнему блоку питания.
2. Рабочее напряжение: 5 В, - простая интеграция с датчиками, персональным компьютером.
3. Поддержка цифровых входов/выходов с ШИМ для управления скоростью вращения двигателей: 6 шт.
4. Поддержка аналоговых входов для считывания данных с датчиков: 6 шт.
5. Частота работы: 16 МГц, - период дискретизации таймера 0,0625 мкс, что позволяет реализовать прерывания по таймеру, необходимые для решения задач измерения диаметра и провисания нити, ПИД-регулирования без существенных задержек выполнения программы.

3.2.3 Лазерное оборудование

Для получения достоверных данных с датчика важно обеспечить падение луча света на пиксели датчика при его прямолинейном прохождении от источника света к фотодиодной линейке. Использование лампы накаливания или светодиодов бытового применения не справляются с данной задачей, так как имеют рассеянный луч света и не обеспечивают точного освещения пикселей датчика, для этого используется лазер невысокой мощности. Решено использовать наиболее доступный вариант от фирмы Laserland.

Основные технические характеристики используемого лазера приведены в таблице 4, а внешний вид на рисунке 8.

Таблица 4 – Технические характеристики лазера LaserLand

Параметр	Значение
Питание, В	5
Мощность, Вт	1
Длина волны, нм	(635 – 850)



Рисунок 8 – Лазер Laserland

3.2.4 Экструзионная установка

Проектируемое решение рассматривается для экструзионной установки BestRuder производства BestFilament, г. Томск. Основные технические характеристики представлены в таблице 5 [5].

Таблица 5 – Технические характеристики экструзионной установки

Параметр	Значение
Погрешность в диаметре изготавливаемой нити, мм	$\pm 0,05$
Производительность, ч/кг	(6 – 8)
Мощность, Вт	500
Напряжение, В	220

Установка обладает преимуществами в плане ее мобильности, но в период проведения экспериментов работоспособность экструдера, как комплексной системы, отсутствовала. В данном случае из этой системы

использовалась только его часть: наматывающее устройство (корпус, двигатель, ролики, зубчатая передача), блок питания.

Двигатель-намотчик IG22C0110-401K1R в составе с понижающим редуктором, питающемся от сети с постоянным напряжением 12 В.

Решение на выбор данного экструдера было принято по причине узкого ассортимента, а промышленные экструдеры занимают большое пространство и устанавливаются в цехах, поэтому настройка системы стабилизации диаметра в лабораторных условиях будет невозможна.

3.2.5 Дополнительное оборудование

В дополнение для проведения экспериментов выбраны следующие устройства. Питание для лазерного оборудования. Для этого используется стабилизатор напряжения LM2596, и блока питания, в качестве которого применяется переносной аккумулятор Дехр-2.6-В с выходным напряжением 5 В и током 1 А. Строительный фен DWT HLP-1500 KL. Технические характеристики которого указаны в таблице 6 [10].

Таблица 6 – Технические характеристики строительного фена

Параметр	Значение		
Тип фена	Пистолетный		
Мощность, Вт	1500		
Макс. Производительность, л/мин	480		
Режимы работы вентилятора (производительность), л/мин	200	280	480
Уровни температуры в соответствии со скоростью, °С	Температура окружающего воздуха	300	500

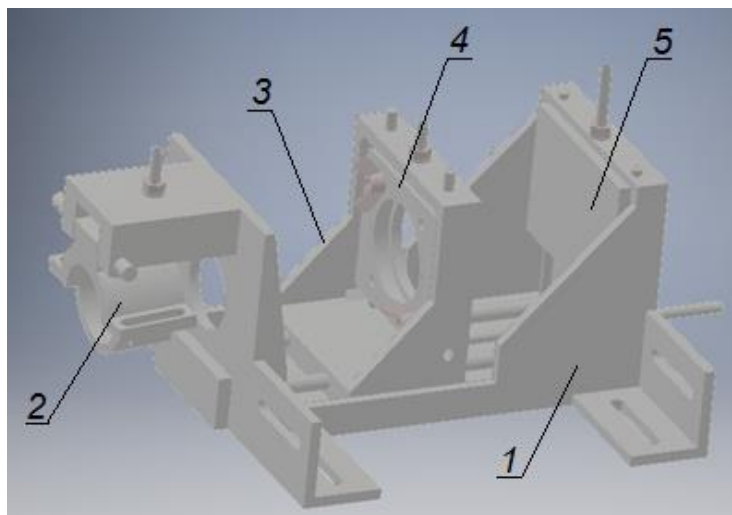
Необходимость данного прибора: разогрев и размягчение полимерной нити для придания ей пластичности при проведении экспериментов до

состояния, соответствующего состоянию на выходе из фильеры экструзионной установки (температура, пластичность материала).

3.3 Проектирование и изготовление каркаса устройства для системы

Для качественной настройки системы было решено создать самостоятельную основу, на которой будут располагаться датчик, плата управления, лазерное оборудование. Возможность регулировки и точной подстройки взаимно расположенных компонентов системы (датчик, лазер, система линз) позволяют скорректировать направление распространения светового луча лазера на фотодиодный датчик, а также тени, создаваемой полимерным прутом. Система линз необходима, как способ формирования луча света и тени для повышения точности работы системы.

На основе выбранного оборудования при помощи САПР Autodesk Inventor 2018 была получена 3D-модель каркаса. На рисунке 9 представлен общий вид модели – сборка.



1 – основа устройства, корпус, на котором закрепляются все остальные элементы; 2 – держатель лазера, состоящий из двух половин, охватывающих цилиндрический корпус лазера; 3 – рама крепления линзовой системы; 4 – линзовая система; 5 – основа крепления датчика.

Рисунок 9 – Модель каркаса устройства

Этап изготовления подразумевал печать на 3D-принтере Anycubic I3 Mega каждой отдельной детали устройства, которые были впоследствии собраны. На рисунке 10 напечатанный каркас устройства с установленными и также напечатанными компонентами и элементами крепежа.

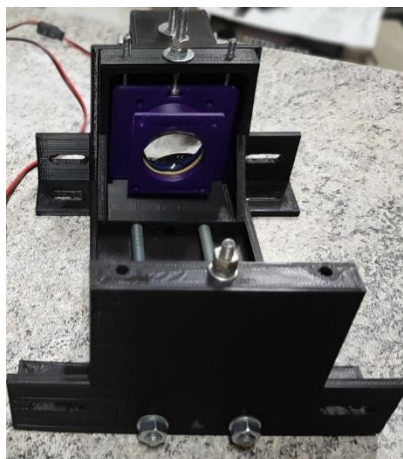


Рисунок 10 – Каркас устройства с закрепленными компоненты системы

3.4 Подключение и настройка датчика

Согласно технической документации, на рисунке 11 представлена временная диаграмма работы фотодиодного датчика.

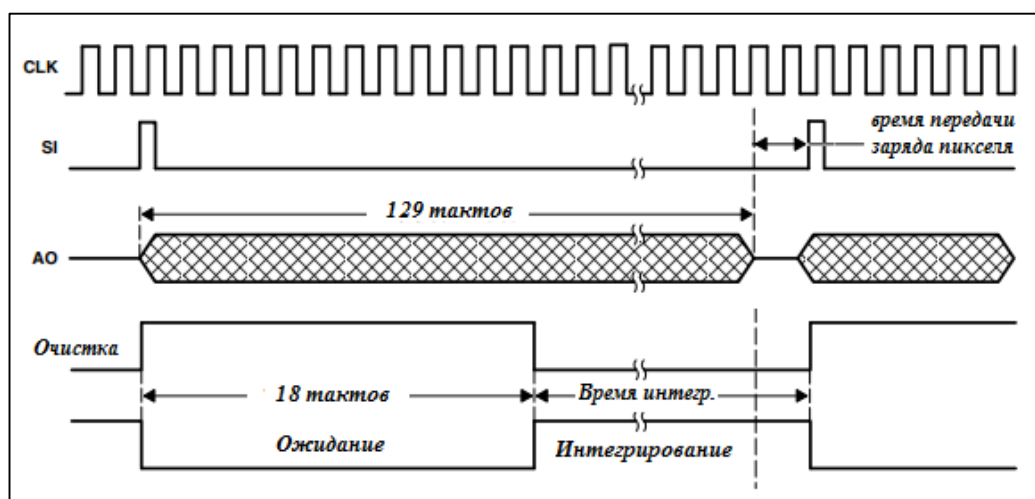


Рисунок 11 – Временная диаграмма фотодиодного датчика

Время интегрирования - это время между положительными импульсами SI (Начало интегрирования) за вычетом 18 тактов ожидания (синхроимпульсов). Посылка положительного импульса в SI запускает новый цикл очистки и записи

данных пикселей и настройки интеграции. Должно произойти минимум $(n + 1)$ тактовых импульсов, где n - количество пикселей, до того, как следующий положительный импульс будет подан SI.

Изменяя время интегрирования, можно получить желаемое выходное напряжение на выходном выводе, избегая насыщения для широкого диапазона уровня освещенности.

Считывание данных и обработка для преобразования значений в диаметр и положение прутка представлено в приложении А в качестве листинга программы.

Программное формирование блока ПИД-регулирования также описано в приложении А, где используются прерывания по таймеру, так как регулятор должен стабильно с периодом дискретизации (200 мс) выдавать управляющий сигнал на ОУ.

3.5 Проведение экспериментов

Суть проведения экспериментов – установление математической модели системы, с последующим синтезом регулятора, применением его в реальных условиях с проверкой соответствия реакции полученной системы по стабилизации диаметра тому, что было определено математически.

Рассматривая контур регулирования провисания нити (внутренний), была снята зависимость положения нити от единичного воздействия двигателя-намотчика при 50 % сигнале ШИМ, поданного с платы управления, путем проведения восьми одинаковых экспериментов. Длительность каждого составляла порядка 195 мс, в течение которого было получено по 13 значений с дискретизацией в 15 мс, что соответствует периоду получения данных с датчика.

Рассматривая внешний контур – контур измерения и стабилизации диаметра, порядок нахождения математической модели заключается в следующем. Процесс получения характеристики проводится в динамике, так как величина провисания и, соответственно, диаметра зависит от времени с момента

выхода из фильеры. Путем разогрева полимерной нити до состояния, соответствующего состоянию на выходе из экструдера (температура порядка 200 °C), фиксируется значение провисания нити, и измеряется её диаметр во времени. Так снимается ряд опытов, для установления зависимости диаметра во времени от величины провисания. В ряде экспериментов на протяжении 5000 мс с изменением провисания были получены 16 значений отклонения от нормы в диаметре, то есть от 1,75 мм.

При помощи пакетов прикладных программ математических расчетов PTC Mathcad, Matlab Simulink и электронной таблицы Microsoft Excel обрабатываются данные экспериментов, определяются параметры для нахождения коэффициентов ПФ, моделируются системы, синтезируются регуляторы.

3.6 Определение математической модели системы стабилизации провисания нити (внутреннего контура)

Согласно полученным данным экспериментов по нахождению математической модели внутреннего контура, было найдено среднее значение положения нити в каждый момент времени. На рисунке 12 показана характеристики объекта провисания нити, полученные на основе серии опытов и найдена средняя. Точками обозначены значения положения в каждый соответствующий момент времени для каждого эксперимента.

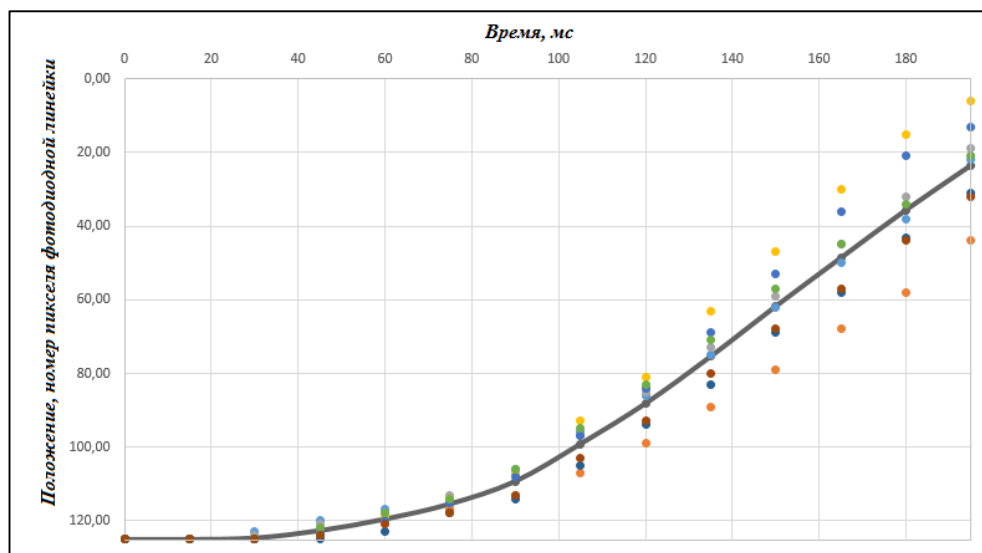


Рисунок 12 – Зависимость положения нити от ступенчатого воздействия двигателя-намотчика во времени

На графике сплошной линией обозначена средняя линия исследуемой зависимости, прерывистыми линиями – результаты отдельных экспериментов. Характеристика по средней линии отражает реальное поведение объекта и может быть описана математически, характеристики отдельных опытов значительно отличаются друг от друга и не могут быть приняты в качестве описания объекта.

К полученной характеристике объекта была проведена касательная и получено ее уравнение, найдены параметры для определения математической модели объекта (значение по оси ординат в начальный момент времени a и значение времени при пересечении касательной оси абсцисс L). На рисунке 13 приведено определение параметров для модели по характеристике объекта. Сплошной линией показана характеристика объекта, прерывистой – касательная.

Полученное уравнение касательной:

$$y(x) = -0,865x + 192,175. \quad (1)$$

В связи с особенностями проведения экспериментов на рисунке положение нити отображено в обратном порядке, поэтому в уравнении касательной (1) знак минус перед коэффициентом угла наклона.

По форме характеристики объекта предполагается описание его реальным интегрирующим звеном:

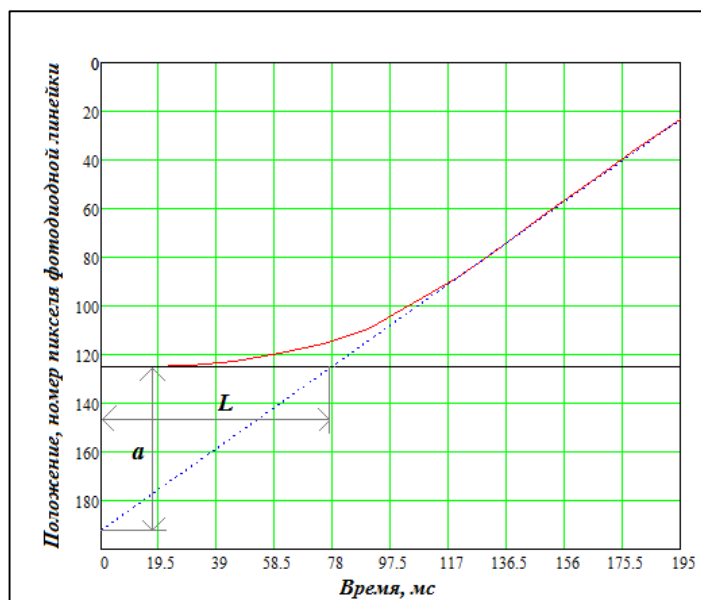


Рисунок 13 – Нахождение параметров касательной к кривой экспериментальных данных

$$W(s) = \frac{k}{s(Ts + 1)}, \quad (2)$$

где $W(s)$ – передаточная функция звена;

k – коэффициент усиления;

s – оператор Лапласа;

T – постоянная времени.

Из графика касательной параметр $a = 192,175 - 125 = 67,175$; $L = 77,66$. Значение величины k модели соответствует значению угла наклона касательной без знака минус, то есть $k = 0,865$. Постоянная времени модели найдена из графика и соответствует L , то есть $T = 77,66$.

В итоге модель (2) примет вид:

$$W(s) = \frac{0,865}{s(77,66s + 1)}. \quad (3)$$

Полученная передаточная функция (3) была набрана в Matlab Simulink для определения соответствия математической характеристики реальному объекту при ступенчатом воздействии двигателя-намотчика (рисунок 14).

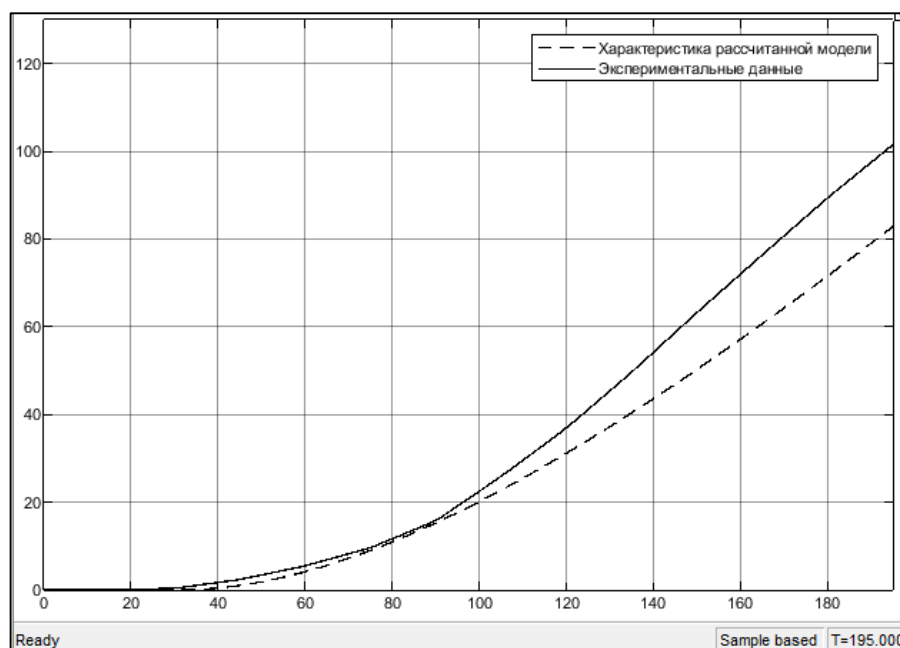


Рисунок 14 – Сравнение экспериментальной кривой с рассчитанной объекта провисания нити

Можно сделать вывод, что полученная математическая модель не может описывать реальный объект ввиду значительного расхождения значений после 100 мс, был добавлен коэффициент запаздывания $\tau = 30$ мс, однако также требуется корректировка модели.

Увеличивая коэффициент k , добились более резкого возрастания кривой. Коэффициент T влияет на время задержки нарастания, путем его повышения добились соответствия характеристик. Полученная передаточная функция:

$$W(s) = \frac{1,35}{s(115s + 1)} e^{-30s}. \quad (4)$$

На рисунке 15 представлен результат корректировки расчета модели. Сплошной линией обозначена характеристика на основе экспериментальных данных, штриховая линия – характеристика модели (3), пунктирная линия – подобранная характеристика модели (4).

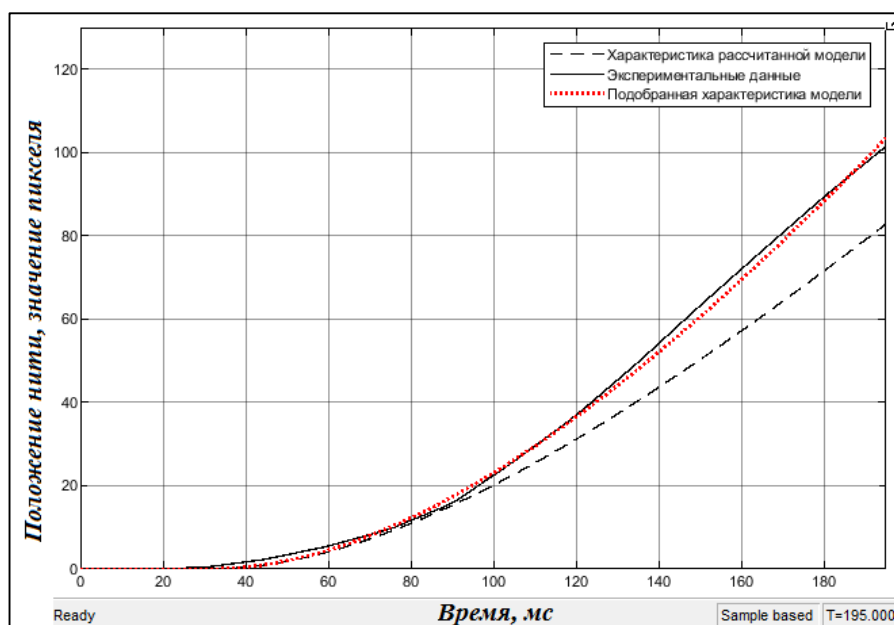


Рисунок 15 – График полученной ПФ объекта провисания нити

Подобранная модель (4) с практически пригодной точностью описывает ОУ.

Стабилизация подразумевает выход на установившееся заданное значение и ее поддержание, и чтобы этого добиться, потребуется провести синтез регулятора.

При расчете коэффициентов регулятора требуется определить параметры объекта модели (4) (разомкнутой системы), для этого повторяются действия с поиском касательной и расчетом коэффициентов a_1 и L_1 .

На рисунке 16 изображена кривая найденной модели (сплошная линия) и касательная к ней (пунктирная линия).

Полученное уравнение касательной:

$$y_1(x) = -0,89x + 197,35. \quad (5)$$

Из графика касательной параметр $a_1 = 197,35 - 125 = 72,35$; $L_1 = 81,29$.

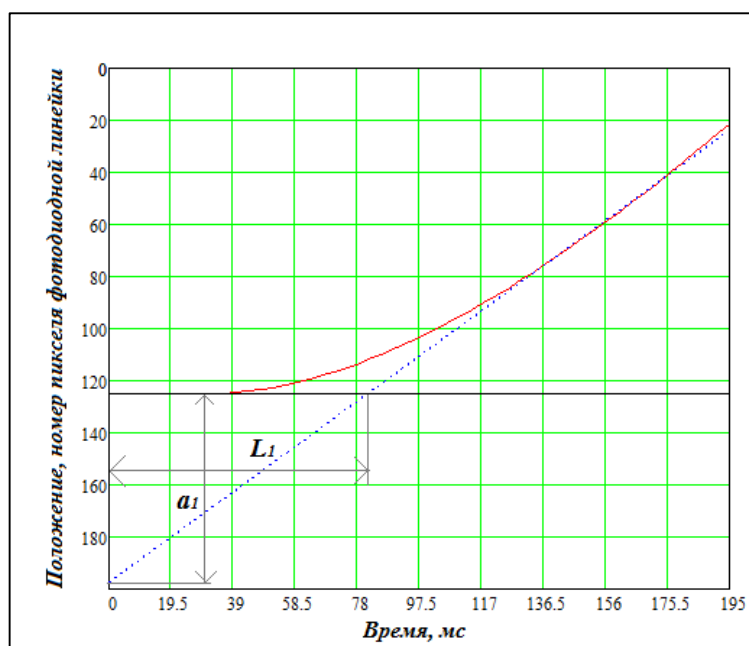


Рисунок 16 - Нахождение параметров касательной к кривой найденной модели

3.7 Ввод и настройка регулятора внутреннего контура

Математическое описание ПИД-регулятора имеет следующий вид:

$$Y(t) = Y_{offset} + K_p \cdot \left(e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^{T_i} e(t) + T_d \frac{de(t)}{dt} \right), \quad (6)$$

где $Y(t)$ – управляющее воздействие;

Y_{offset} – стационарное значение;

K_p – пропорциональный коэффициент, коэффициент передачи;

$e(t)$ – сигнал рассогласования (ошибка);

T_i – постоянная интегрирования;

T_d – постоянная дифференцирования.

Рассматривая внутренний контур управления, для ранее найденной ПФ объекта провисания нити под воздействием двигателя-намотчика и параметров касательной к кривой, определяются параметры регулятора. На рисунке 17 выделен контур, который рассматривается из всей системы. Текущая задача – синтез регулятора PID1.

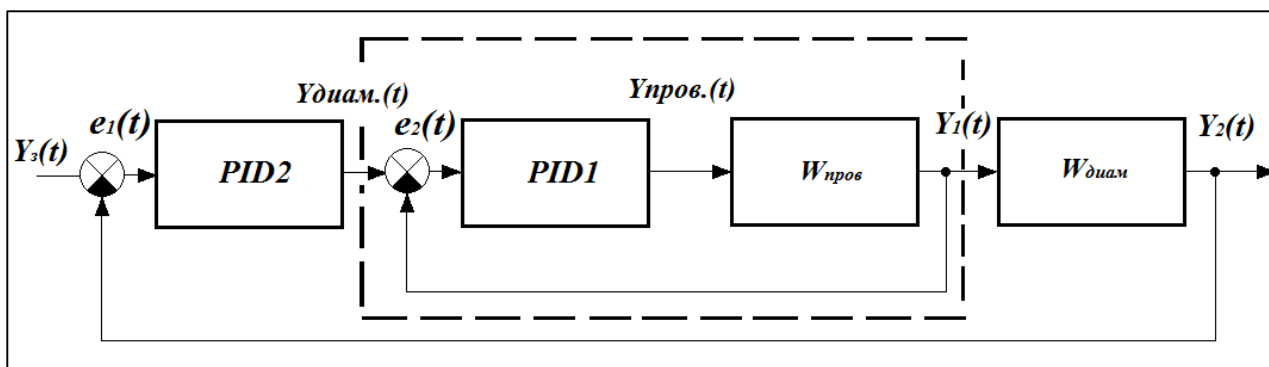


Рисунок 17 – Модель системы стабилизации провисания в форме блоков ПФ

В пакете математического моделирования Matlab Simulink контур выглядит так, как представлен на рисунке 18.

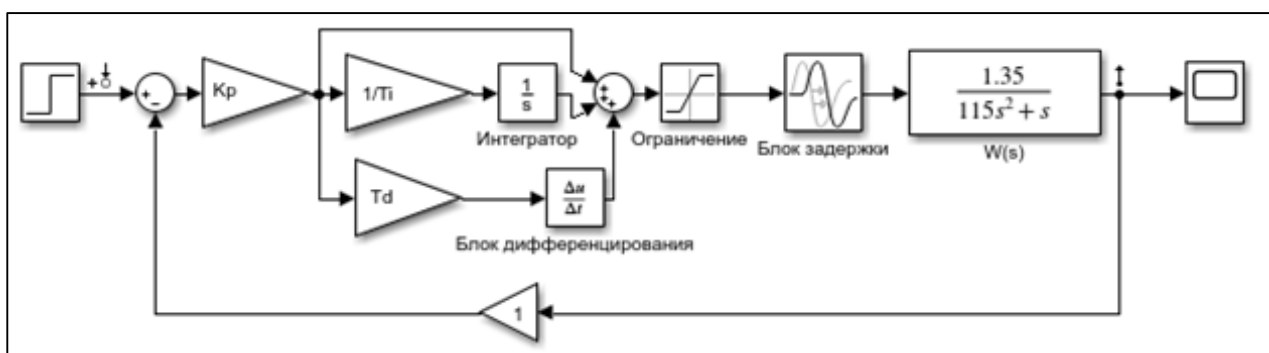


Рисунок 18 – Математическая модель контура стабилизации провисания полимерной нити с регулятором

В данном случае можно выделить:

- блок ограничения (Saturation), необходим для того, так как двигатель постоянного тока имеет ограничение по максимальной скорости;
- блок задержки (Transport Delay), вводит задержку протекания процесса.

В качестве методов определения коэффициентов регулятора были выбраны способ Циглера-Никольса (ZN), метод Чина-Хронса-Ресвика (CHR) и ручная настройка. Далее в таблице 7 указаны формулы для определения коэффициентов [11].

Таблица 7 – Формулы расчета коэффициентов регуляторов по методам ZN и CHR

Метод ZN	Расчет по отклику на скачок			Метод CHR	Без перерегулирования		
Регулятор	K_p	T_i	T_d	Регулятор	K_p	T_i	T_d
П	$\frac{1}{a}$	–	–	П	$\frac{0,3}{a}$	–	–
ПИ	$\frac{0,9}{a}$	$\frac{3 \cdot L}{K_p}$	–	ПИ	$\frac{0,35}{a}$	$\frac{1,2 \cdot L}{K_p}$	–
ПИД	$\frac{1,2}{a}$	$\frac{0,9 \cdot L}{K_p}$	$\frac{0,5 \cdot L}{K_p}$	ПИД	$\frac{0,6}{a}$	$\frac{L}{K_p}$	$\frac{0,5 \cdot L}{K_p}$

В таблице используются параметры a и L , которые определяются по параметрам касательной к прямой максимального угла наклона, проведенной для кривой, ранее были найдены по графику рисунка 16. Параметры $a_1 = 72,35$; $L_1 = 81,29$. В таблице 8 отображены рассчитанные коэффициенты регуляторов, которые исследованы на модели.

Регулятор с интегральной составляющей отсутствует, так как в ПФ модели имеется интегратор. Поэтому проводится моделирование П-, ПД-регуляторов.

Таблица 8 – Рассчитанные коэффициенты регуляторов по методам ZN и CHR, ручной метод

Метод ZN	Расчет по отклику на скачок			Метод CHR	Без перерегулирования		
Регулятор	K_p	T_i	T_d	Регулятор	K_p	T_i	T_d
П	0,0138	–	–	П	0,0041	–	–
ПД	0,0166	–	2448,49	ПД	0,0083	–	4896,99
Ручной метод	0,001	–	–	Ручной метод	0,001	–	–

Для полученных значений коэффициентов регуляторов, был проведен ряд сравнительных моделирований процесса. Особенностью является включение белого шума (с 5-ти процентной мощностью от мощности ступенчатого сигнала и периодом 15 мс, соответствующим периоду считывания значений с датчика) в цепь обратной связи, имитирующей помехи на датчике при измерении

провисания полимерной нити. На рисунке 19 представлен белый шум, используемый при моделировании.

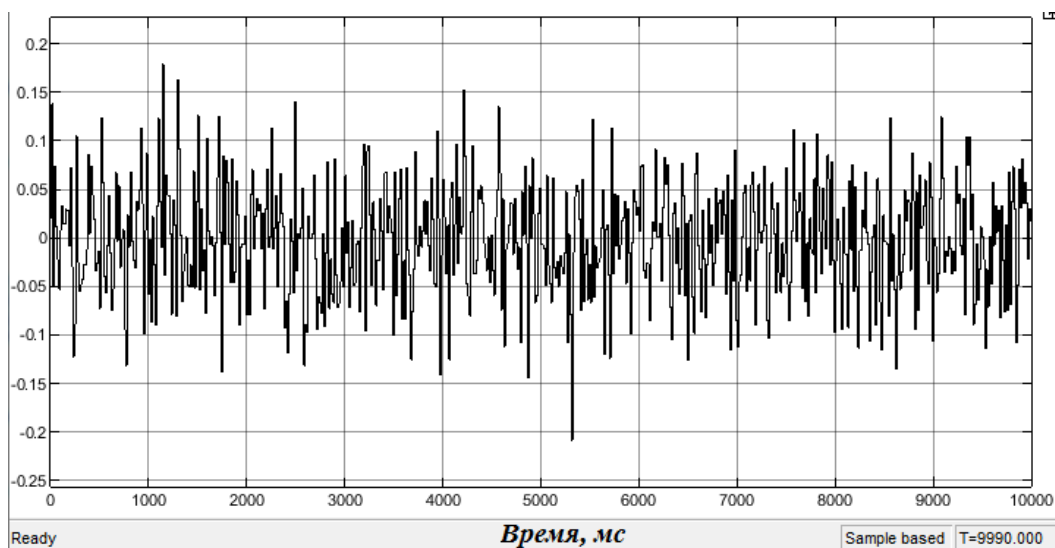


Рисунок 19 – Белый шум, использованный при проведении моделирования

На рисунке 20 представлен результат реакции ступенчатого единичного воздействия на систему с регуляторами, настроенными по методу ZN, без воздействия шума и под воздействием.

Метод ZN настройки регуляторов показал, что система установилась на единичном значении при использовании ПД-регулятора без влияния шума, под воздействием шума система становится неуправляемой. Ручным методом удалось достичь удовлетворительных показателей переходного процесса (ПП) (низкое время ПП – менее 2000 мс, отсутствие перерегулирования), при использовании П-регулятора. Влияние шума незначительное, и результирующее значение не превышает 5 % отклонения от нормы.

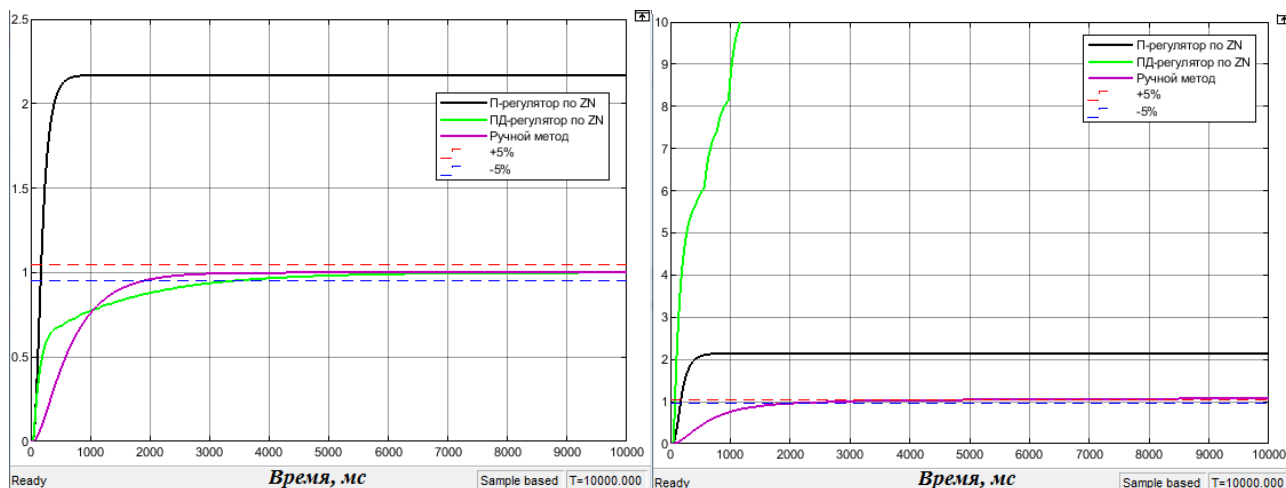


Рисунок 20 – Реакция системы без воздействия шума (слева) и под воздействием шума (справа)

На рисунке 21 представлен результат реакции ступенчатого единичного воздействия на систему с регуляторами, настроенными по методу CHR, без воздействия шума и под воздействием.

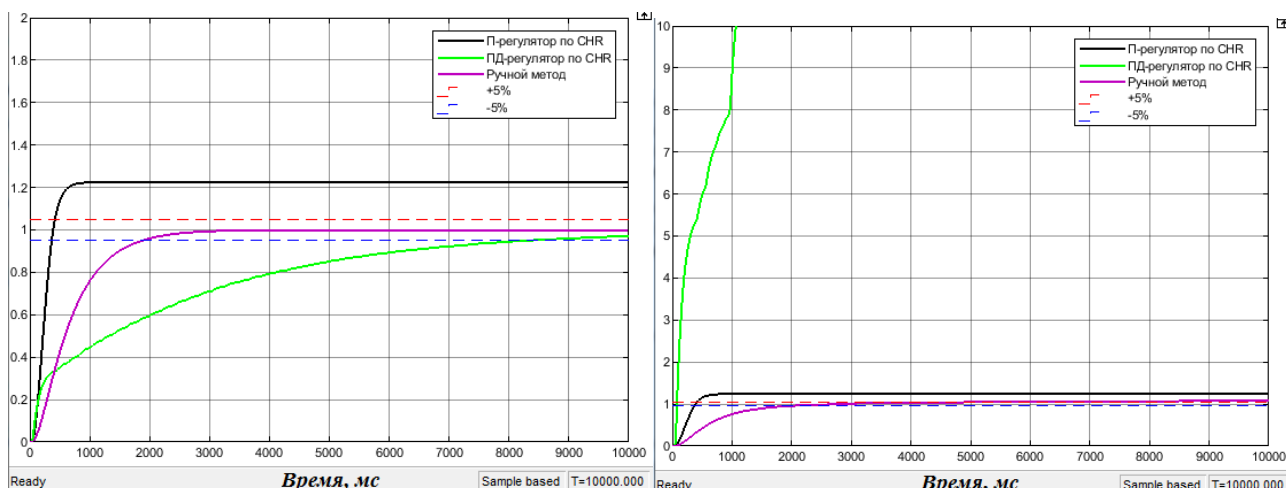


Рисунок 21 – Реакция системы без воздействия шума (слева) и под воздействием шума (справа)

Метод CHR настройки регуляторов показал, что система в результате отработала ступенчатое воздействие аналогично, но с некоторыми отличиями от настройки по методу ZN. В целом результат хуже, так как приближение к единичному установившемуся значению меньше. ПД-регулятор без шума показал чрезмерное время переходного процесса более 8000 мс, под воздействием шума система становится неуправляемой. П-регулятор справляется с задачей в данном случае лучше других регуляторов. Методом

ручной настройки добились установления на единичном значении (время ПП менее 2000 мс, отсутствие перерегулирования). Влияние шума незначительное, и результирующее значение не превышает 5 % отклонения от нормы.

В итоге был выбран для внутреннего контура П-регулятор с $K_p = 0,001$, настроенный по ручному методу.

3.8 Определение математической модели системы стабилизации диаметра нити (внешнего контура)

Согласно полученным данным экспериментов по нахождению математической модели внешнего контура, было найдено среднее значение отклонения диаметра в каждый момент времени. На рисунке 22 показана характеристики объекта зависимости отклонения от нормы диаметра нити от ее положения во времени.

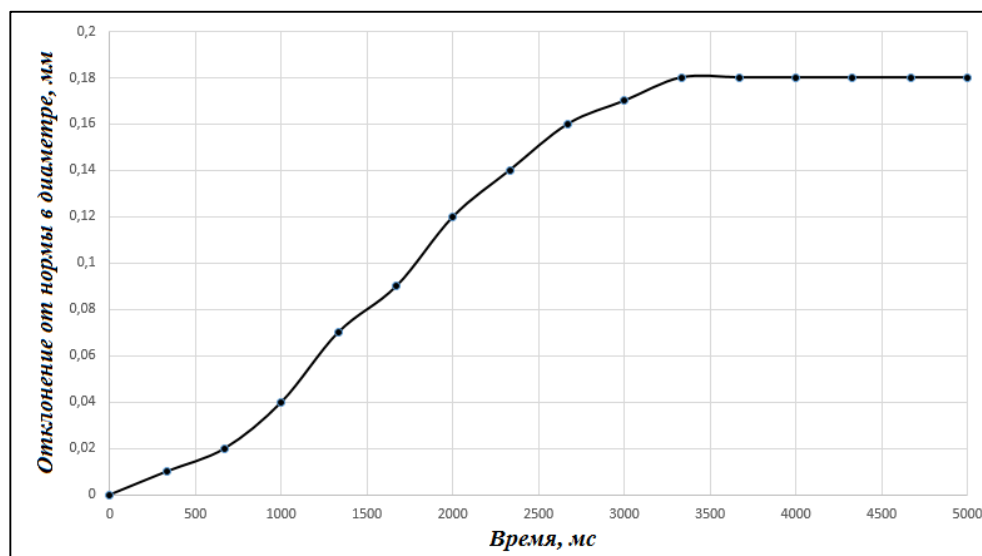


Рисунок 22 – Экспериментальные данные для исследования внешнего контура

На графике сплошной линией обозначена средняя линия исследуемой зависимости в результате проведения экспериментов. Характеристика по средней линии отражает реальное поведение объекта и может быть описана математически.

По форме характеристики объекта предполагается описание его апериодическим звеном второго порядка, ПФ которого имеет вид:

$$W(s) = \frac{k}{T_2^2 s^2 + T_1 s + 1}, (2T_2 \leq T_1), \quad (7)$$

где $W(s)$ – передаточная функция аperiodического звена второго порядка;
 k – коэффициент усиления;
 s – оператор Лапласа;
 $T_{1,2}$ – постоянные времени.

К полученной характеристике объекта была проведена касательная и получено ее уравнение, найдены параметры для определения математической модели объекта (значение суммы постоянных времени $T_1 + T_2$: значение времени от линии пересечения касательной с продолжением характеристики объекта до точки касания касательной линии характеристики объекта). На рисунке 23 приведено определение параметров для модели. Сплошной линией показана характеристика объекта, прерывистой – касательная.

Полученное уравнение касательной:

$$y_2(x) = 0,0000746x - 0,0292. \quad (8)$$

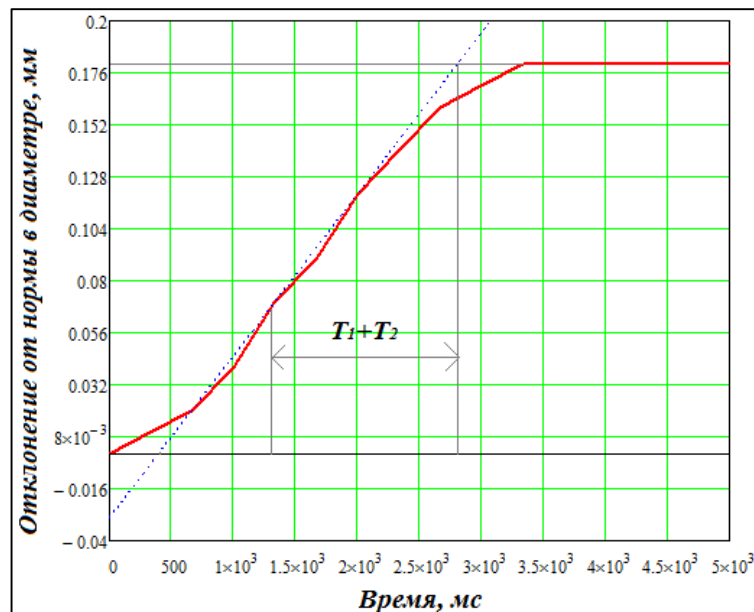


Рисунок 23 – Нахождение параметров объекта модели по касательной к кривой экспериментальных данных

Из графика найдено значение суммы и далее рассчитаны значения постоянных времени:

$$T_1 + T_2 = 2804,29 - 1330 = 1474,29, \quad (9)$$

$$2T_2 \leq T_1 \rightarrow 2T_2 = T_1, \quad (10)$$

$$T_1 = 982,86; T_2 = 491,43. \quad (11)$$

Передаточная функция модели (7) примет вид:

$$W(s) = \frac{0,18}{491,43^2 s^2 + 982,86s + 1}, \quad (12)$$

где $k = 0,18$ – коэффициент усиления, он равен конечному значению характеристики объекта.

Полученная передаточная функция (12) была набрана в Matlab Simulink для определения соответствия математической характеристики реальному объекту (рисунок 24).

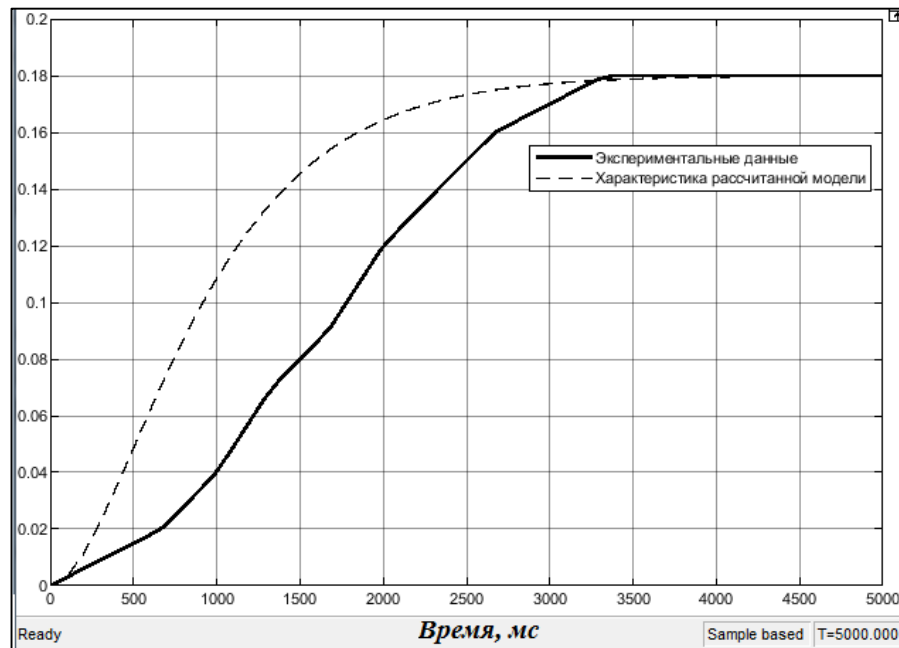


Рисунок 24 – Сравнение экспериментальной кривой с рассчитанной объекта изменения диаметра нити от провисания во времени

Можно сделать вывод, что полученная математическая модель не может описывать реальный объект ввиду значительного расхождения значений от 0 до 3000 мс, требуется корректировка модели.

Путем проведения моделирования с разными значениями коэффициентов была получена подобранная модель объекта (пунктирная линия) в сравнении с

характеристикой по экспериментальным данным (сплошная линия) и первоначально рассчитанной моделью (штриховая линия) (рисунок 25).

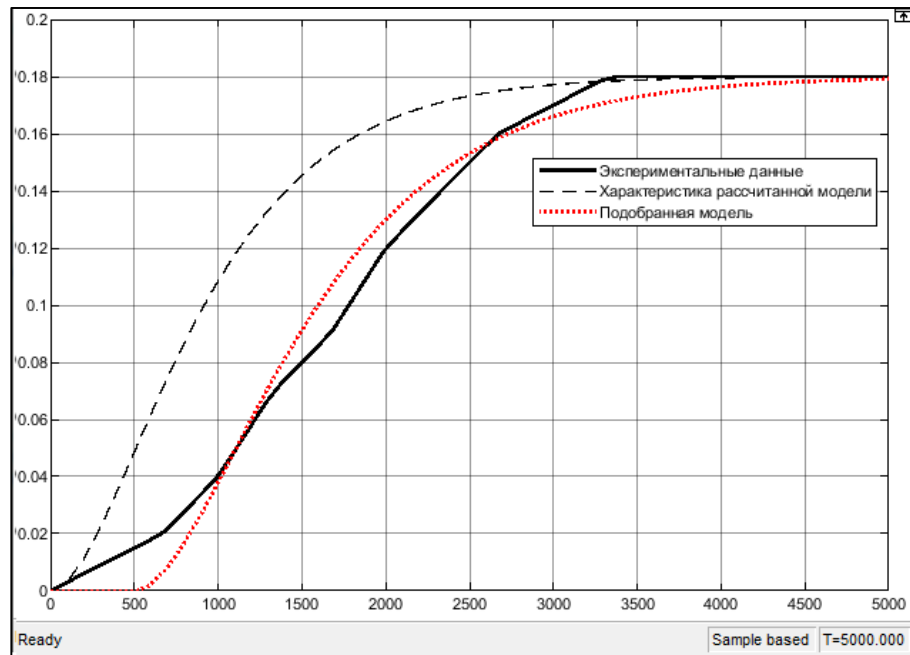


Рисунок 25 – Сравнение подобранной модели с экспериментальной кривой и с рассчитанной объекта изменения диаметра нити от провисания во времени

Итоговая передаточная функция модели примет вид:

$$W(s) = \frac{0,18}{(491s + 1)(690s + 1)} e^{-500s}, \quad (13)$$

В данном случае ПФ (12) характеризует внешний контур, но не определяет ПФ объекта изменения диаметра во времени $W_{\text{диам}}$ (рисунок 26).

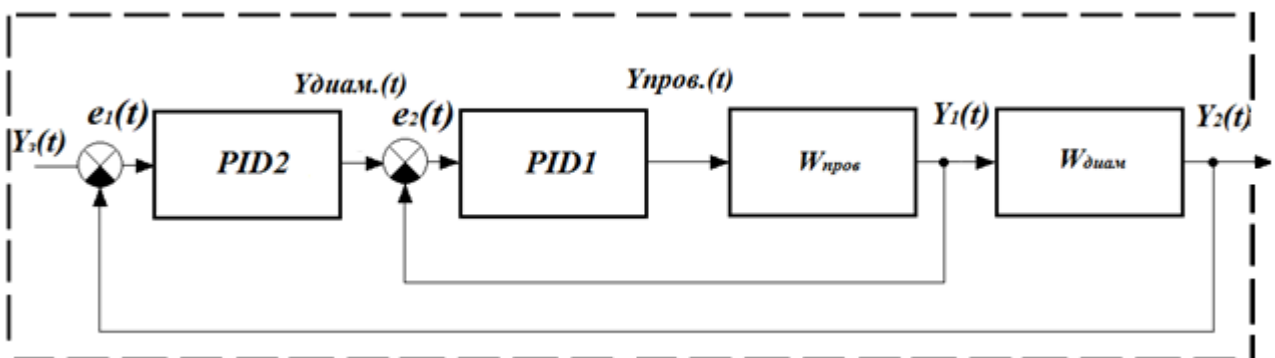


Рисунок 26 – Схема ОУ

Необходимо определить ПФ этого объекта путем деления ПФ (12) на ПФ (4) с контуром регулирования, то есть внутреннего контура. Далее приведены необходимые расчеты по нахождению $W_{\text{диам}}$.

ПФ стабилизации провисания полимерной нити (внутренний контур):

$$W_{\text{внутр}}(s) = \frac{\frac{0,001 \cdot 1,35}{115s^2 + s}}{1 + \frac{0,001 \cdot 1,35}{115s^2 + s}} = \frac{0,00135}{115s^2 + s + 0,00135} \quad (14)$$

ПФ объекта изменения диаметра во времени:

$$W_{\text{диам}}(s) = \frac{\frac{0,18}{(491,43s + 1)(690s + 1)}}{\frac{0,00135}{115s^2 + s + 0,00135}} = \frac{133,3 \cdot (115s^2 + s + 0,00135)}{338790s^2 + 1181s + 1} \quad (15)$$

Для этого объекта $\tau = 470$, как разность времени запаздывания ПФ (13) и ПФ (4).

Полученная передаточная функция (15) была набрана в Matlab Simulink, а характеристика объекта представлена на рисунке 27.

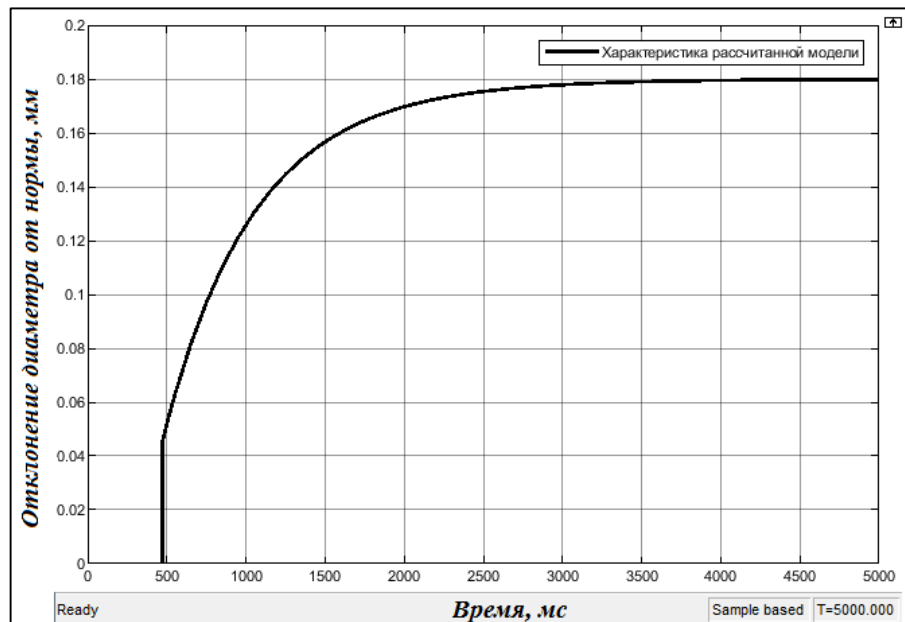


Рисунок 27 – График полученной ПФ объекта изменения диаметра во времени (внешнего контура)

Для проверки правильности расчета ПФ (15) исследуется реакция ступенчатого воздействия на модель системы внутреннего контура $W_{\text{внутр}}$,

последовательно соединенного с объектом $W_{\text{диам}}$. В результате характеристика данного исследования должна совпадать с характеристикой рассчитанного объекта изменения диаметра нити от провисания во времени (13). На рисунке 28 показана исследуемая модель, а на рисунке 29 графики характеристик для сравнения.

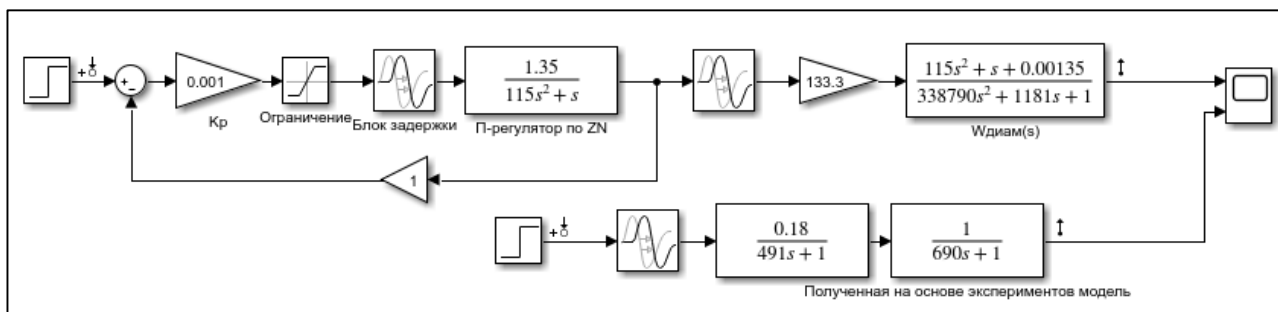


Рисунок 28 – Модель для сравнения характеристик ОУ

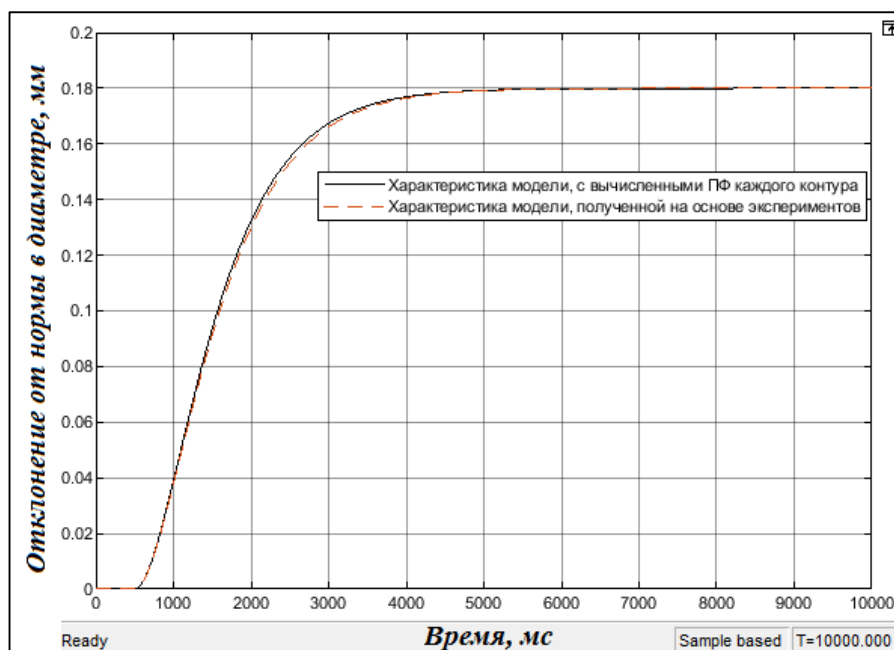


Рисунок 29 – График сравнения характеристик полученных моделей объекта управления

Можно сделать вывод, что расчет $W_{\text{диам}}$ был произведен верно, так как характеристики совпадают.

На основе полученной модели с определенными ПФ объектов управления каждого контура, или же для всей системы стабилизации диаметра, производится настройка регулятора. Для этого к кривой характеристики модели проводится

касательная и, как в настоящей работе ранее определялось, вычисляются параметры a_2 и L_2 .

На рисунке 30 изображена кривая найденной модели (сплошная линия) и касательная к ней (пунктирная линия).

Полученное уравнение касательной:

$$y_3(x) = 0,0001067x - 0,065711. \quad (5)$$

Из графика касательной параметр $a_2 = 0,065711$; $L_2 = 615,85$.

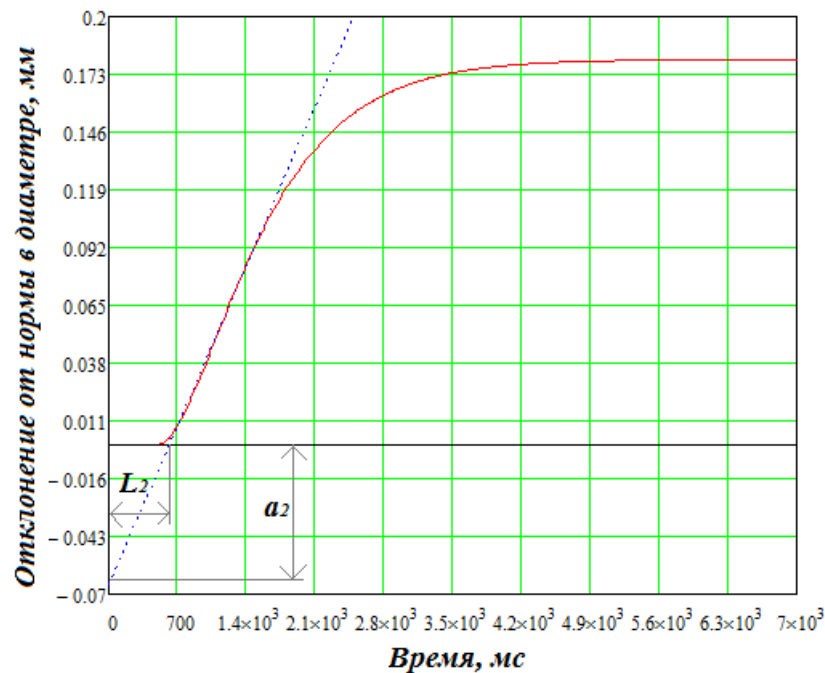


Рисунок 30 – Нахождение параметров касательной к кривой модели

3.9 Ввод и настройка регулятора внешнего контура

Рассматривая внешний контур управления, для ранее найденных ПФ объектов управления и параметров касательной к характеристике, определяются параметры регулятора. Текущая задача — синтез регулятора PID2 внешнего контура, согласно рисунку 26.

В пакете математического моделирования Matlab Simulink контур регулирования выглядит так, как представлен на рисунке 31.

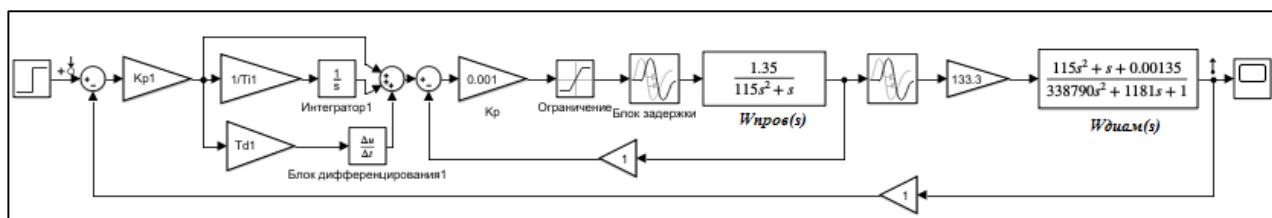


Рисунок 31 – Математическая модель стабилизации диаметра полимерной нити

В качестве методов определения коэффициентов регулятора были выбраны способ Циглера-Никольса (ZN), метод Чина-Хронса-Ресвика (CHR) и ручная настройка. Используя таблицу 7, с ранее указанными формулами для определения коэффициентов, произвели расчет коэффициентов на основе параметров $a_2 = 0,065711$ и $L_2 = 615,85$. Значения коэффициентов занесены в таблицу 9, которые исследованы на модели.

Таблица 9 – Рассчитанные коэффициенты регуляторов по методам ZN и CHR, ручной метод

Метод ZN	Расчет по отклику на скачок			Метод CHR	Без перерегулирования		
Регулятор	K_p	T_i	T_d	Регулятор	K_p	T_i	T_d
П	15,22	—	—	П	4,57	—	—
ПИ	13,70	134,86	—	ПИ	5,33	138,65	—
ПИД	18,26	30,35	16,86	ПИД	9,13	67,45	33,73
Ручной метод	6,4	5000	—	Ручной метод	6,4	5000	—

Для полученных значений коэффициентов регуляторов, был проведен ряд сравнительных моделирований процесса. В процесс также вводился шум (с 5-ти процентной мощностью от мощности ступенчатого сигнала и периодом 15 мс (рисунок 19), соответствующим периоду считывания значений с датчика), в данном случае в оба контура, в обратную связь, имитирующий помехи на датчике при измерении провисания и диаметра полимерной нити.

На рисунке 32 представлен результат реакции ступенчатого единичного воздействия на систему с регуляторами, настроенными по методу ZN, без воздействия шума и под воздействием.

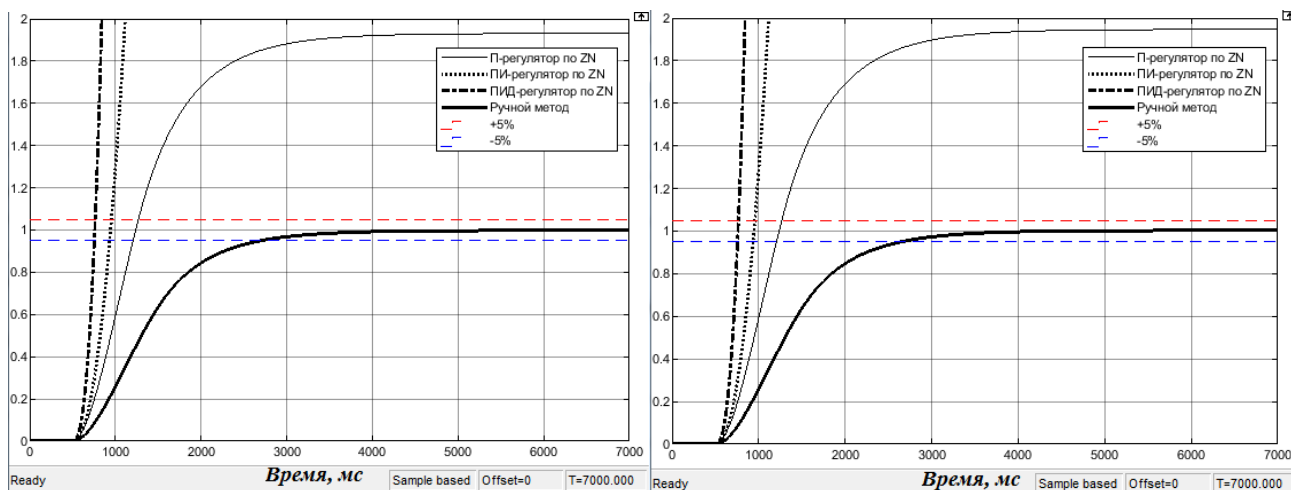


Рисунок 32 – Реакция системы без воздействия шума (слева) и под воздействием шума (справа)

Метод ZN настройки регуляторов показал, что система не установилась на единичном значении при использовании каждого вида регулятора. П-регулятор имеет некоторое приближение к единичному значению, однако требует корректировки. Влияние шума в целом не имеет незначительное. Ручным методом удалось достичь удовлетворительных показателей ПП (низкое время ПП – менее 3000 мс, отсутствие перерегулирования и ошибки регулирования), при использовании ПИ-регулятора. Влияние шума практически отсутствует, незначительно увеличивая время переходного процесса, результирующее значение не превышает 5 % отклонения от нормы.

На рисунке 33 представлен результат реакции ступенчатого единичного воздействия на систему с регуляторами, настроенными по методу CHR, без воздействия шума и под воздействием.

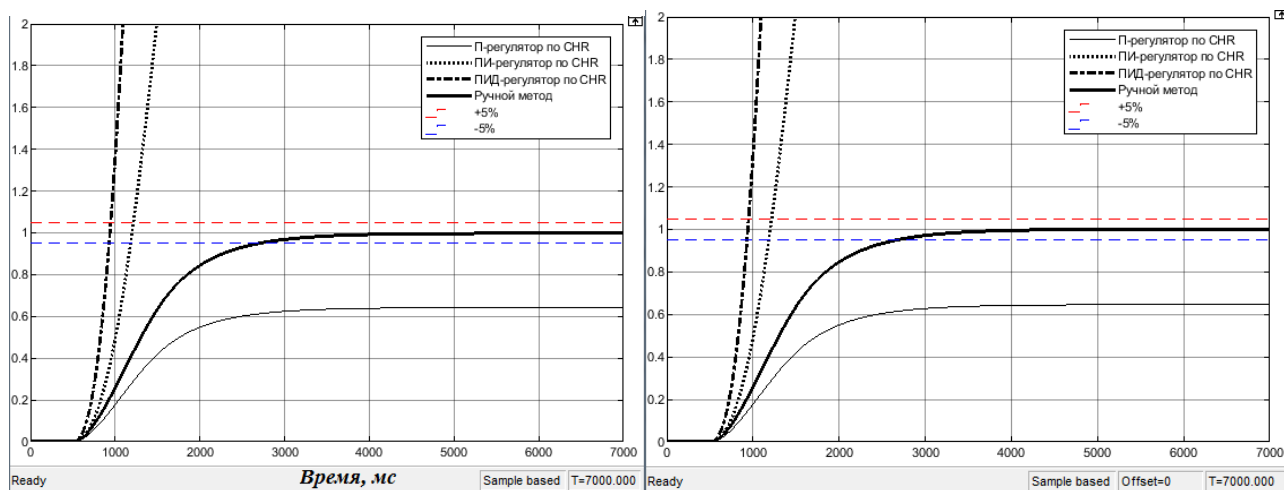


Рисунок 33 – Реакция системы без воздействия шума (слева) и под воздействием шума (справа)

Метод CHR настройки регуляторов показал, что система в результате отработала ступенчатое воздействие также неудовлетворительно, как и по методу ZN. ПИ-регулятор ручным методом настройки справляется с задачей в данном случае лучше других регуляторов. Удалось добиться установления на единичном значении (время ПП менее 2000 мс, отсутствие перерегулирования). Влияние шума практически отсутствует, результирующее значение не превышает 5 % отклонения от нормы.

Методы настройки регулятора могут использоваться только тогда, когда моделируется простая линейная система без воздействия шума. В нашем же случае, для моделирования реальной системы метод ручной настройки оказывается предпочтительным, приводя систему к устойчивому значению. Регуляторы внутреннего и внешнего контуров настроены теоретически верно, что подтверждают результаты моделирования. Если на вход системы приходит ступенчатый сигнал разных значений, то система установится к соответствующему значению, что представлено на рисунке 34.

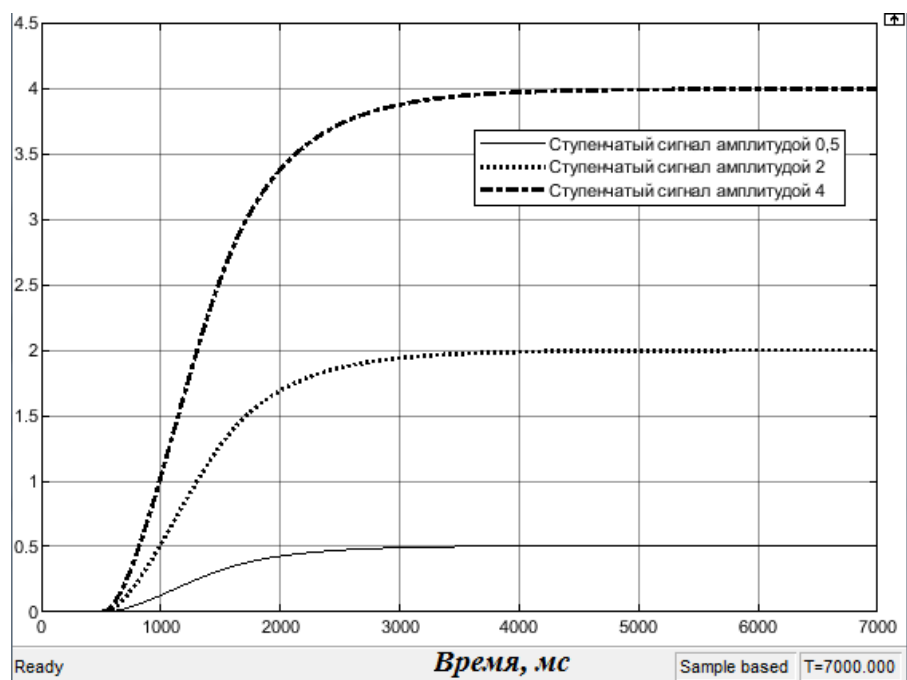


Рисунок 34 – Реакция системы на различное значение ступенчатого воздействия

В итоге был настроен регулятор как для внутреннего контура регулирования (использовался П-регулятор с $K_p = 0,001$, настроенный по ручному методу, так и для внешнего (использовался ПИ-регулятор с $K_p = 6,4$ и $T_i = 5000$, настроенный по ручному методу).

Далее предполагается использование рассчитанных данных в регуляторе на базе микроконтроллера, то есть проведение отладки системы стабилизации диаметра нити на оборудовании, на котором были сняты опытные данные для исследования двух контуров. Затем будет проведено сравнение реальных данных, снятых с рабочей системы стабилизации диаметра полимерной нити, с математическими расчетами с целью установления правильности расчетов и определения поведения объекта управления.

4 Концепция стартап-проекта

4.1 Название

Идея создать и реализовать полимерную нить для 3D-печати с повышенной точностью в диаметре в целях повышения качества изготавливаемой продукции, удовлетворяющей множественные запросы потребителей разных отраслей жизнедеятельности человека. Внедрение и значительное масштабирование на рынке данного продукта позволит охватить новые целевые аудитории с более высокими технологическими запросами, такими как медицина, машиностроение и архитектура, увеличит спрос на более простую и дешевую технологию 3D-печати, при этом повышая ее результаты.

Основываясь на идею и само разрабатываемое решение, было определено название для стартап проекта:

«Полимерная нить для 3D-печати с высоким показателем точности».

4.2 Описание продукта как Результата НИР

В результате выполнения НИОКР решается проблема недостаточной точности при изготовлении полимерной нити для 3D-печати при использовании технологии послойного наплавления (FDM от англ. fused deposition modeling). Предлагаемое решение – продажа полимерной нити с использованием технологии стабилизации диаметра полимерной нити для 3D-печати. На текущий момент наиболее характерный параметр точности изготовления для данного продукта – это значение диаметра с погрешностью в пределах 50 микрон. Предлагаемое решение позволяет снизить погрешность до 10 микрон. Данное усовершенствование необходимо, так как, произведя несложные расчеты при стандартных параметрах печати (диаметр полимерной нити – от 1,7 до 1,8 мм, диаметр сопла – 0,3 мм, расстояние от подающего устройства до «хот энда» 100 мм, поворот подающего двигателя на треть оборота, диаметр катушки подающего материал двигателя – 10 мм), получено значительное отклонение в

объемах используемого материала ($\approx 3 \text{ мм}^3$ при подаче 10,4664 мм материала для диаметра нити в 1,7 мм и 1,8 мм, крайние значения которых заявлены производителями нормой, то есть в пределах погрешности). Для печатаемой модели при исходной погрешности на один и тот же угол поворота двигателя длина выходного материала будет отличаться на $\approx 40 \text{ мм}$. Данное значение предельно критично при печати объектов небольших размеров и приводит к неудовлетворительным результатам в связи с появлением наслоений или пропуска материала, что было подтверждено в рамках реализации научных студенческих проектов ИШИТР (Инженерной школы информационных технологий и робототехники) ТПУ. Математические расчеты подтверждают тот факт, что даже незначительные изменения в диаметре значительно влияют на конечное качество продукции. Также это подтверждает использование другой технологии печати в сферах деятельности, где необходима высокая точность, например, медицинская, ювелирная, сфера машиностроения. При печати крупных объектов данный факт менее заметен, но все же приводит к ухудшению внешнего вида объекта, так как появляются изъяны, которые накладываются с каждым слоем.

Для подтверждения необходимости разработки в ТПУ проводятся лабораторные исследования. Измеряются размеры распечатанного объекта, сравнивается качество полученной модели. Были проведены первые сравнительные тесты, где выявлено, что фактическое отклонение от заявленной точности в диаметре полимерной нити колеблется в пределах (20 – 30) микрон. Это, вероятно, связано с тем, что данные по точности производитель указывает для экспериментальной катушки, а в серийном образце показания диаметра значительно отличается, что явно указывает на необходимость внедрения системы стабилизации при производстве полимерной нити. Также было установлено, что нить с меньшей погрешностью позволяет печатать более аккуратно переходные элементы (углы, дугообразные элементы). Готовая деталь имеет размеры, наиболее соответствующие закладываемым при проектировании размерам детали (высота

распечатанной детали 120,0 мм против 120,3 мм у низкокачественной нити, диаметр цилиндра 15,0 мм против 14,8 мм).

4.3 Интеллектуальная собственность

Достижение высокой точности и заявленного качества полимерной нити обеспечивается благодаря технологической разработке проектной группы, которая основывается на усовершенствовании базового оборудования по производству полимерной нити на экструзионной установке BestRuder. Среди параметров отклонение диаметра прутка не более 50 микрон. Технологические усовершенствования будут составлять коммерческую тайну и не подлежат патентованию на текущий момент. В случае публикации информации о технологии будет оформлен патент. При этом будет рассматриваться возможность и перспективы коммерциализации и масштабирования технологии. Особенностью данного проекта можно считать возможность охраны как авторского, так и патентного права.

4.4 Объем и емкость рынка

В качестве определения потенциальных потребителей был рассмотрен целевой рынок, затем произведено его сегментирование (таблица 10).

Таблица 10 – Карта сегментирования рынка полимерной нити для 3D-печати

Критерий		Предлагаемая установленная погрешность в диаметре полимерной нити							
		50 микрон				30 микрон		10 микрон	
Потребитель	Крупная компания								
	Средняя компания								
	Мелкая компания								
	Физическое лицо								

Цвета на схеме обозначены основные компании-производители полимерной нити в России:

- синий цвет – ABS Maker;
- оранжевый цвет – Bestfilament;
- серый цвет – Filamentarno;
- зеленый цвет – REC.

Также указаны зарубежные производители полимерной нити:

- красный цвет – Boots Industries;
- фиолетовый цвет – MatterHackers;
- коричневый цвет – 3D FilaPrint.

По карте сегментирования рынка видно, что ниша, в которой производится нить с точностью в 10 микрон в диаметре абсолютно пустая, отсутствует предложение продукта с данным показателем качества. При точности в 50 микрон занята ниша физических лиц и мелких компаний. Имея невысокую точность, полимерная нить интересна тем потребителям, где нет повышенных требований, либо это нивелируется стоимостью, где она является более важным фактором при ее выборе среди различных предложений. Для крупных и средних компаний используются другие, более дорогие, DLP и SLA

технологии печати, где применяется не полимерная нить, а жидкий полимер с отверждением под ультрафиолетовыми лучами. Они преимущественны там, где предъявлены более высокие требования к точности продукта, изготавливаемого на 3D-принтере, а более дешевая технология наплавления полимерной нити (FDM) пока их не дает. При точности в 30 микрон рынок уже занят обширнее, выше точность – шире сфера применения более дешевой технологии FDM. Тем самым, увеличив точность изготавливаемой полимерной нити, можно занять все ниши: как крупных компаний, так и более мелких компаний, и физических лиц.

Объем и емкость рынка оценивалась для внутреннего рынка, для внешнего рынка есть исследования MarketsAndMarkets по перспективам развития рынка 3D-печати [16], которые могут помочь в освоении и для выхода на внешний рынок.

Объем продаж в годовом объеме полимерной нити в России по данным одного из первых и крупнейших производителей материалов для 3D-печати на период 2018 года составляет порядка (100 – 120) млн. рублей. Оценочные данные представлены сооснователем и генеральным директором компании REC [17].

Компания занимает, приблизительно, половину рынка по производству пластика для 3D-принтеров [17], так как вторую половину (40 – 50) % занимает томская компания по производству пластика Bestfilament.

Но можно отметить, что в России работают не только эти две компании, но также довольно много мелких компаний (≈ 10 % рынка), среди которых можно отметить:

- PrintProduct – первый в Санкт-Петербурге производитель расходных материалов для 3D-принтеров;
- Sorytka – производитель сопутствующего материала для 3D-принтеров при основной деятельности производства труб, фитингов, пластиковых колодцев;

- Filamentarno – московский производитель пластиковых нитей с хорошими показателями точности, но значительно уступающий по объемам производства двум основным производителям;

- ABS Maker – малоизвестный производитель небольшого ассортимента продукции, информации о которой очень незначительно, что делает ее наименее привлекательной среди всех конкурентов.

Зарубежных производителей полимерной нити огромное количество, представим некоторых из них:

- Matterhackers – американский производитель полимерной нити, один из крупнейших в области 3D-печати, в их ассортименте не только полимерная нить, но и сами принтеры, а также другие расходные материалы;

- ColorFabb – голландский производитель полимерной нити, их особенность заключается в постоянном создании новых видов материалов для нитей, экспорт продукции более чем в 60 стран мира, использование лазерного контроля качества диаметра нити (точность в диаметре – 50 микрон);

- 3D FilaPrint – английский производитель полимерной нити для разных отраслей промышленности, в том числе для крупных компаний, где используется печать FDM. Имея качественное оборудование, удалось добиться реальной точности при производстве нити выше заявленной, она соответствует 30 микрон.

4.5 Анализ современного состояния и перспектив развития отрасли

Согласно исследованиям «MarketsAndMarkets», перспективы развития рынка 3D печати впечатляющие. Рынок нити для 3D-печати оценивается в 1,3 миллиарда долларов США в 2018 году и, по прогнозам, достигнет 4,4 миллиарда долларов США к 2023 году, при среднем уровне роста в 27,1 % с 2018 по 2023 год [16]. Растущий спрос и применение в различных индустриях конечного использования и увеличивающаяся осведомленность о технологии 3D-печати – главные управляющие факторы для рынка нити 3D-печати.

4.6 Планируемая стоимость продукта

Конечная стоимость продукции будет основываться на том, сколько времени будет окупаться внедрение технологии стабилизации диаметра для производства готового продукта. Чтобы определить оптимальную цену и время окупаемости, проведены расчеты.

Дополнительно к экструзионной установке при разработке добавлены первоначальные расходы:

- пластик для печати корпуса модели 800 грамм – 1112 рублей [18];
- крепежи - метизы – 245 рублей;
- линзы – 1900 и 1230 рублей – в дальнейшем потребуются более качественные линзы по 5000 рублей;
- плата Arduino Uno – 2270 рублей [9];
- соединительные провода – 330 рублей;
- фотодиодная линейка TSL1401CL – 1200 рублей;
- стабилизатор питания LM2596 – 60 рублей;
- лазер Laserland с длиной волны 635-850 нм – 2400 рублей;
- прочие расходы (ноутбук для отладки и программирования, дополнительные расходные материалы и комплектующие) – 18833 рублей.

Расчеты представлены в виде таблиц (11 – 17). Дополнительные комментарии к расчетам указаны далее.

Учитывая темпы роста рынка 3D-печати в 27,1 % в год, исходная выручка компании 50000 тыс. рублей, за три года средняя выручка в год вырастет до 60700 тыс. рублей. Помимо производства обычным способом добавляется данная разработка, которая дополнительно приносит прибыль. В первый квартал добавляется 0,8 % выручки, или 368 катушек, при годовом объеме 46000 катушек. Существует возможность реализовать данное количество за 3 месяца. Затем по нарастающей выручка увеличивается вместе с ростом объемов производства. В расчетах учитывается все, что связано только с

разрабатываемым оборудованием, которое будет установлено на имеющиеся станки.

Налог равен 6 % от выручки, при выручке за год менее 150 млн. руб.
 $\text{Маржинальная прибыль} = \text{Выручка} * \text{Маржа, \% (таблица 14)}$.
 $\text{Операционная прибыль} = \text{Маржинальная прибыль} - \text{Постоянные расходы}$.
 $\text{Инвестиции} = \text{Расходы в инвестиционный период (первоначальные + постоянные)} + \text{Убытки (отрицательная операционная прибыль)}$.
 $\text{Срок окупаемости} = \text{Инвестиции} / (\text{Среднегодовая операционная прибыль} - \text{Среднегодовые \% по кредиту})$.
Проценты по кредиту рассчитываются, так как источником финансирования выбирается банковский кредит.

Так по результатам расчетов срок окупаемости составит 223 дня при средней стоимости продукта 1100 рублей за катушку массой 1 кг. Данный факт реализуем при тесном сотрудничестве с компанией-партнером Bestfilament, которая готова предоставить оборудование, на котором проводится внедрение системы, предоставить помощь в отладке и запуске в работу.

Таблица 11 – План доходов

Показатель	1 квартал	2 квартал	3 квартал	4 квартал	2 год	3 год	ИТОГО
Изменение объемов продаж	100 %	+ 90 %	+ 70 %	+ 50 %	+ 75 %	+ 80 %	
Выручка, тыс. руб.	500	950	1615	2422,5	9603,1	17285,6	32376,2
ИТОГО, тыс. руб.	500	950	1615	2422,5	9603,1	17285,6	32376,2

Таблица 12 – Расчет первоначальных расходов

Показатель	Пояснения к видам расходов	Сумма, тыс. руб.
Оборудование	Дополнительно к экструзионной установке материальные затраты	29,58
Программное обеспечение	Разработка программного обеспечения	2 * (16,46 + 13,94)
Монтаж, отладка	Сборка и установка оборудования по месту, а также ее настройка, тестирование	2 * (16,46 + 13,94)
Прочие	Расходы на дополнительное оборудование, устранение неисправностей	45
ИТОГО		196,18

Таблица 13 – Анализ расходов на заработную плату

Категория работников	Кол-во человек	Формы оплаты труда		
		Комиссионные, % от выручки	Оклад, руб. в месяц на человека	Итого по окладной форме, руб. в месяц
Оператор - наладчик	4		30000	120000
ИТОГО, % от выручки		0	X	X
ИТОГО, руб. в месяц		X	X	120000

Таблица 14 – Расчет маржинальности продукта

Показатель	Пояснения к видам расходов	% от выручки
Выручка		100
Расходы в % от выручки, в том числе:	Общий процент расходов	31,53
• Материалы и комплектующие	Сырье для производства нити	4
• Зарплата в % (таблица 13)	Зарплата оператору-наладчику станка	13
• Надбавка к зарплате	За работу в ночные смены	2,6
• Социальные Взносы (30,2% от зарплаты)	Отчисления в социальные фонды	3,93
• Налог	Налог по упрощенной системе налогообложения	6
• Прочие	Расходы на обслуживание оборудования, калибровка	2
Маржа (выручка - расходы), %		68,47

Таблица 15 – Расчет текущих постоянных расходов

Наименование ресурсов	1 квартал	2 квартал	3 квартал	4 квартал	2 год	3 год	ИТОГО
Зарплата по окладам (таблица 13 и 14)	430,2	430,2	430,2	430,2	1720,8	1720,8	5162,4
Соц. взносы (30,2% от зарплаты)	129,9	129,9	129,9	129,9	519,6	519,6	1558,8
Реклама и продвижение	300	150	150	150	700	500	1950
ИТОГО	865,1	715,1	715,1	715,1	2960,4	2760,4	8731,2

Таблица 16 – Бюджет проекта, единица измерения - тыс. руб.

Показатель	Инвестицион- ный период	1 квартал	2 квартал	3 квартал	4 квартал	2 год	3 год	ИТОГО
Выручка (таблица 11)	X	500	950	1615	2422,5	9603,1	17285,6	32376,2
Маржинальная прибыль	X	342,4	650,5	1105,8	1658,7	6575,2	11835,5	22167,9
Постоянные расходы (таблица 15)	-	865,1	715,1	715,1	715,1	2960,4	2760,4	8731,2
Первоначальные расходы (таблица 12)	196,18	-	-	-	-	-	-	196,18
Операционная прибыль (убыток)	X	(522,7)	(64,6)	390,7	943,6	3614,8	9075,1	13436,7
% по кредиту	X	12,7	12,7	12,7	12,7	-	-	50,8
Инвестиции	783,48	X	X	X	X			783,48
Срок окупаемости, год		783,48 / (390,7 + 943,6 – 50,8) = 0,61 года → 223 дня						

Таблица 17 – Определение источников финансирования

Инвестор	Сумму, которую нужно привлечь	Сумму, которую берем у инвестора	Остаток суммы
Личные финансы	783,48	20	763,48
Финансы семьи, друзей	763,48	50	713,48
Банки	713,48	713,48	0
Проценты, 13 %	50,8		

4.7 Конкурентные преимущества создаваемого продукта, сравнение технико-экономических характеристик с отечественными и мировыми аналогами

Отечественные и мировые аналоги предлагают расходный материал – полимерную нить – с точностью изготовления в 50 микрон, в основном, и (20 – 30) микрон в редких случаях. Цена при этом варьируется в пределах (1500 – 2000) рублей за 1 кг материала из наиболее распространенного ABS или PLA пластика.

Исходная текущая розничная цена расходного материала производителя, для которого разрабатывается система стабилизации диаметра – (800 – 1700) рублей. С учетом изначально более низкой цены повышение качества готового продукта приведет к увеличению итоговой стоимости, которая будет в пределах текущих цен на материалы других производителей с меньшей точностью.

В целях сравнения конкурентных технических решений различных производителей полимерной нити приведем таблицу 18.

Таблица 18 – Конкурентные преимущества создаваемого продукта

Наименование компании производителя	Страна	Цена (руб. за кг)	Точность в диаметре (микрон)	Охват сфер применения	Доля на рынке в России
Bestfilament	Россия	(800 – 1700)	(20 – 50)	Бытовое применение; архитектура; реклама; образование; машиностроение.	49 %
REC	Россия	(1000 – 1500)	50		49 %
MatterHackers	США	(1500 – 2500)	(20 – 50)		-
Проект совместный с Bestfilament	Россия	(1100 – 1500)	10	+ Медицина; + точное машиностроение; + ювелирная промышленность; + изготовление оптоволоконных линий	+ 40 % к рынку Bestfilament

Анализируя данные, можно сделать вывод о том, что разрабатываемое решение конкурентоспособно, имея при этом главный требуемый технический

показатель на более высоком уровне. Необходимость учитывать конкурентные решения значительно сказывается на успешности проекта. Так по исследованиям проектной группы были выявлены преимущества в сравнении продукта представленных производителей. Помимо этого, стоит учесть, что снижается величина брака, и по прогнозам уменьшится с 5 до 1 % при внедрении системы у партнера.

4.8 Целевые сегменты потребителей

Сферы рынка, где необходима полимерная нить:

- машиностроение – на стадии проектирования разрабатываются модели для их тестирования в специальных камерах для прохождения соответствия по аэродинамическим параметрам (автомобили, мотоциклы);
- авиакосмическая индустрия – создание, моделирование, представление новых конструкторских решений, а затем их отработка на макете (новые формы ракеты, спутниковой антенны, моделирование подвижных элементов), точность модели во многом определяет дальнейшие характеристики реального объекта;
- архитектура и проектирование – создание технических сооружений, мостов, зданий, парков. Моделирование позволяет получить точную уменьшенную копию;
- медицина, в том числе стоматология – разработка новых материалов позволит печатать органы для человека, но уже сейчас распространена печать зубов на 3D-принтере, точность готового зуба определяет комфорт и безопасность пациента;
- ювелирная промышленность – точность и красота для каждого, а новые компоненты помогут создать совершенные продукты;
- образование – проведение практических и лабораторных занятий, обучение новым технологиям, отработка идей школьников и студентов на практике, помощь в реализации творческих проектов;

- дизайн и реклама – не только идеи для творчества, но и привлечение новых клиентов за счет создания уникальных форм объектов, продвижение их на рынке;
- потребительские товары – печать любых форм, но ограниченных размеров от ручки на рабочем столе до переходников для шланга в огороде. Замена практически любых поврежденных изделий.

Клиенты – инженеры, архитекторы, дизайнеры, преподаватели, и просто массовый потребитель, который заинтересован в 3D-печати, для удовлетворения личных нужд.

Потребительский сегмент не ограничивается данным списком. В планах стоит выход на перспективный сегмент рынка по выпуску оптоволоконных линий для сферы телекоммуникаций. Полимерные материалы с учетом их технологического развития могут быть конкурентоспособными по отношению к оптоволоконным линиям, изготавливаемых в настоящее время из стеклянных материалов. Это возможно при условии тщательной отладки системы стабилизации.

4.9 Бизнес-модель проекта. Производственный план и план продаж

Для успешной реализации проекта выработка бизнес-модели является ключевой, особенно для описания бизнес плана и дальнейшего продвижения на рынке. Далее в таблице 19 описана бизнес-модель по А. Остервальдеру и И. Пинье.

Таблица 19 – Бизнес-модель проекта по А. Остервальдеру и И. Пинье

<i>Ключевые партнеры</i> Соконкуренция: Компания Bestfilament – лидер российского рынка, привлечена в проект в качестве основного партнера и соинвестора. Соконкуренция: Стратегическое сотрудничество со следующими партнерами: поставщиками сырья (гранул пластика) для производства полимерной нити; компании, для которых готовый продукт проекта – расходный материал (машиностроительные компании, образовательные учреждения).	<i>Ключевые виды деятельности</i> Производство. Изготовление полимерной нити с высоким показателем точности – готовый продукт. Разрешение проблем. Решение проблемы низкого качества 3D-печати. <i>Ключевые ресурсы</i> Технология производства, которая позволяет выйти с партнером на новые рынки. Материальные ресурсы – сырье для изготовления полимерной нити.	<i>Ценностные предложения</i> Продукт, который имеет характеристики: 1. Относительная новизна. 2. Высокая точность - высокое качество 3D-печати. 3. Низкая цена. 4. Сокращение расходов и повышение производительности – минимум остановок в работе оборудования, стабильное качество. 5. Хорошая доступность продукта благодаря ключевым партнерам. 6. Простота эксплуатации.	<i>Взаимоотношения с клиентами</i> 1. Постоянная техническая поддержка клиентов. 2. Горячая телефонная линия, электронная почта для оформления заказа, помощи при выборе товара. <i>Каналы сбыта</i> Прямые: 1. Интернет-магазин. 2. Филиалы фирменных магазинов. Непрямые: 1. Партнерские магазины.	<i>Потребительские сегменты B2B и B2C</i> Нишевой рынок 3D-печати физических лиц, в дальнейшей предполагается как выход на массовый рынок с ростом внедрения 3D-печати в повседневной жизни. Предприятия, организации, компании целевой направленности 3D-печати.
<i>Структура издержек</i> Фиксированные издержки – заработная плата работникам, налоги, аренда. Переменные издержки – расходные материалы, сырье для изготовления продукта.		<i>Потоки поступления доходов</i> 1. Доход от разовых сделок с физическими лицами. 2. Регулярный доход от периодических платежей, получаемых от крупных машиностроительных предприятий, образовательных учреждений, рекламных и других компаний. Генерирование дохода засчет: 1. Масштабирования продукта. 2. Продажи технологии. 3. Продажа лицензии на выпуск продукции с использованием данной технологии (при патентовании). 4. Реклама продукции.		

4.10 Стратегия продвижения продукта на рынок

Продвижение продукта возможно, если покупатель готов приобрести продукт, который ему действительно нужен.

Наша цель – доказать, что продукция с повышенным качеством станет результатом масштабирования технологии 3D-печати, как возможности изготовления высококачественных изделий, применимых повсеместно, и предложить ее.

Можно выделить следующие способы продвижения продукта:

- познавательные видео о 3D-печати и используемых расходных материалах;
- выставки образцов изделий при использовании предлагаемой продукции;
- реклама и рекламные акции в целях побуждения интереса к продукту, распространение пробников;
- расширение партнерских связей;
- масштабирование объемов производства.

Все это в той или иной степени сказывается на объемах продаж продукции, что позволит увеличить ее внедрение на рынок.

5 Социальная ответственность

Понятие социальной ответственности определено и отражается в международном стандарте IC CSR 26000:2011 [30]. В данном стандарте под рассмотрением находятся вопросы соблюдения трудовых прав персонала, выполнения требований безопасности и гигиены труда, охраны окружающей среды и промышленной безопасности. С учетом стандарта целями текущего раздела были определены меры и мероприятия, исключающие несчастные случаи в производстве, а также снижение вредных воздействий на окружающую среду.

В данной работе рассматривается система управления диаметром полимерной экструзионной установки, для которой характерно соблюдение условий при ее разработке и эксплуатации.

Объектом исследования и разработки является устройство для регулирования температуры нагревателей экструзионной установки и для управления частотой вращения двигателя-намотчика при отклонении от заданного значения диаметра полимерной нити. В состав системы входят: лазер, оптическая система, фотодиодная линейка, микроконтроллер, регулятор.

Рабочим местом является зона, включающая рабочий стол, персональный компьютер, оборудование контроля и настройки разрабатываемой системы. На производственном участке по месту расположения оборудования.

Областью применения данного устройства будет совершенствование оборудования на предприятии по производству полимерной нити для 3D-печати.

5.1 Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности

Понятие продолжительности рабочего времени в каждом конкретном случае устанавливается согласно трудовому договору между работодателем и

работником, согласно конкретному проекту, с учетом выполнения требований ТК РФ [27]. В данном законодательном акте регулируются следующие понятия.

1. Нормальная продолжительность рабочего времени не может превышать 40 часов в неделю.

2. Для работников, занятых на производствах, имеющих дело с вредными и опасными условиями труда, установлено сокращенное рабочее время в течение дня при 36-ти часовой недели – 8 часов, а при 30-ти часовой недели – до 8 часов. Исходя из условий труда работы с конкретным проектом, имея дело с вредными факторами производства, установлено рабочее время в размере 8 часов в день при 36-ти часовой недели.

3. Под понятием времени отдыха подразумевают время, в течение которого сотрудник не выполняет свои трудовые обязанности и использует его на свое усмотрение. В конкретных условиях проекта отдыхом считается время, когда работник не занимается разработкой и наладкой проектируемого решения.

4. Заработная плата каждого работника зависит от многих факторов, определяется квалификацией, видом работы и ее сложностью, качеством и количеством выполняемой деятельности, поэтому максимальным размером не ограничивается, но устанавливается минимальный размер оплаты труда. При разработке проектируемого решения оплата труда устанавливается в соответствии с размером академической стипендии студенту. При эксплуатации готового решения заработная плата устанавливается в соответствии с договором на трудоустройство между работодателем и работником.

Согласно СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03 [28] и ГОСТ 12.2.032-78 ССБТ [29] были установлены следующие требования:

1. Рабочие места с персональной электронно-вычислительной машиной (ПЭВМ) в помещениях с источниками вредных производственных факторов должны размещаться в изолированных кабинах с организованным воздухообменом.

2. Экран монитора должен находиться от глаз пользователя на расстоянии (600 – 700) мм, но не ближе 500 мм с учетом размеров алфавитно-цифровых знаков и символов.

3. Конструкция рабочего стола должна обеспечивать оптимальное размещение на рабочей поверхности используемого оборудования с учетом его количества и конструктивных особенностей, характера выполняемой работы. При этом допускается использование рабочих столов различных конструкций, отвечающих современным требованиям эргономики. Поверхность рабочего стола должна иметь коэффициент отражения (0,5 – 0,7).

4. Конструкция рабочего стула (кресла) должна обеспечивать поддержание рациональной рабочей позы при работе на ПЭВМ, позволять изменять позу с целью снижения статического напряжения мышц шейно-плечевой области и спины для предупреждения развития утомления. Поверхность сиденья, спинки и других элементов стула (кресла) должна быть полумягкой, с нескользящим, слабо электризующимся и воздухопроницаемым покрытием, обеспечивающим легкую очистку от загрязнений.

5. Высота рабочей поверхности стола для взрослых пользователей должна регулироваться в пределах (680 – 905) мм в зависимости от типа выполняемых работ; при невозможности регулировки должна составлять 725 мм как для мужчин, так и для женщин.

6. Конструкция рабочего стула должна обеспечивать: ширину и глубину поверхности сиденья не менее 400 мм; поверхность сиденья с закругленным передним краем; регулировку высоты поверхности сиденья в пределах (400 – 550) мм и углов наклона вперед до 15° и назад до 5° ; угол наклона спинки в вертикальной плоскости в пределах $\pm 30^{\circ}$; стационарные или съемные подлокотники длиной не менее 250 мм и шириной (50 – 70) мм; регулировку подлокотников по высоте над сиденьем в пределах (230 ± 30) мм и внутреннего расстояния между подлокотниками в пределах (350 – 500) мм.

5.2 Производственная безопасность

Оценка возможных и опасных вредных факторов на производстве или в лаборатории при разработке проектируемого решения является обязательным этапом в целях предотвращения непредсказуемости развития ситуаций.

При исследовании объекта рассматривались производственные условия на рабочем месте, которые характеризуются наличием некоторых опасных и вредных факторов согласно ГОСТ 12.0.003-2015 ССБТ [31]. Перечень, а также нормативные документы, согласно которым регламентируются действия каждого выявленного фактора, представлены в таблице 20.

Таблица 20 – Возможные опасные и вредные факторы при разработке проекта

Факторы (ГОСТ 12.0.003-2015)	Этапы работ			Нормативные документы
	Разработка	Изготовление	Эксплуатация	
1.Выделение вредных химических веществ		+	+	Требования к воздуху в рабочей зоне устанавливаются ГН 2.2.5.3532-18 [32]. Требования к шуму устанавливаются ГОСТ 12.1.003-2014 ССБТ [33]. Требования к лазерному излучению устанавливаются ГОСТ Р 12.1.031-2010 ССБТ [34]. Требования к электробезопасности устанавливаются ГОСТ 12.1.019-2017 ССБТ [35].
2.Повышенный уровень шума		+	+	
3.Лазерное излучение		+	+	
4.Поражение электрическим током	+	+	+	
5.Физические статические перегрузки	+	+	+	
6.Нервно-психические перегрузки	+	+	+	

5.2.1 Выделение вредных веществ

Изготовление полимерной нити сопровождается нагревом в экструзионной установке полимерных компонентов. В зависимости от их типа происходит выделение тех или иных вредных веществ. В данном проекте используется ABS-пластик.

При нормальных условиях ABS-пластик является достаточно безопасным и не предоставляет угрозы здоровью, но при нагревании выделяются пары акрилонитрила и стирола – ядовитых веществ, способных вызвать раздражение кожи, слизистых оболочек и отравление. Производство полимерной нити рекомендуется в проветриваемых помещениях, а также с использованием вытяжки. В текущем проекте нагрев сырья происходит при низкой температуре, при (240 – 260) °С, когда выделяется незначительное количество вредных веществ. При вдыхании могут вызвать тошноту и головокружение, при постоянном вдыхании не исключены наиболее серьезные последствия. Таким образом, работу с данным материалом необходимо выполнять только с выполнением вентиляционных мероприятий в помещениях, предназначенных для этого.

Исходя из ГН 2.2.5.3532–18 [32] для акрилонитрила (C_3H_3N), входящий в состав ABS-пластика, определяется величина предельно допустимая концентрация (ПДК) и составляет 5 мг/м³; агрегатное состояние в воздухе в условиях производства, преимущественно, в виде аэрозолей; третий класс опасности (умеренно опасный).

5.2.2 Повышенный уровень шума

На этапах изготовления и эксплуатации объектов проекта наблюдается повышенный уровень шума в рабочей зоне.

Источниками шума на производстве и в лабораторных условиях в данном проекте являются вентиляторы ПЭВМ, вентилятор блока питания и электропривод шнека экструзионной установки, электродвигатель привода намотчика. Уровень шума при производстве полимерной нити составляет 78 дБА (средние данные, получены при помощи программы Sound Meter), что является допустимым уровнем шума для помещения с шумным оборудованием. СН 2.2.4/2.1.8.562-96 [36] определяют предельный уровень шума для легкой напряженности трудового процесса и легкой физической нагрузки в 80 дБА.

Повышенный уровень шума оказывает негативное влияние на центральную нервную, сердечно-сосудистую и иммунную системы человека, угнетая его. Возникают головные боли, головокружения, снижается концентрация внимания и работоспособность. Длительное воздействие может привести к нарушениям слуха человека, сердечно-сосудистым заболеваниям, снижает иммунитет.

Зоны с уровнем шума, превышающем 85 дБА, обозначают с использованием знаков безопасности. В целях защиты от повышенного уровня шума применяют как индивидуальные, так и коллективные средства защиты. В качестве индивидуальных средств могут использовать защитные наушники, а в качестве коллективных средств – использование защитных экранов, шумопоглощающих материалов.

5.2.3 Лазерное излучение

В технологии проектируемой системы используется источник лазерного излучения. При изготовлении и эксплуатации объектов проекта соблюдение правил работы с лазером необходимо во избежание повреждения зрительного аппарата человека.

Используемый лазер Laserland с длиной волны (635 – 850) нм, имеющий класс опасности 3 В, представляет опасность при условии попадания прямого или отраженного луча в глаза.

Правила защитного применения лазера регламентируется ГОСТ 60825-1-2013 [37].

В данном проекте обеспечение защиты пользователя от лазерного излучения производится за счёт использования защитной оболочки корпуса устройства, а также использования материалов с низким коэффициентом отражения ($\approx 0,1$).

5.2.4 Поражение электрическим током

В соответствии с ПУЭ [38] по опасности электрического поражения помещения, в которых проводятся работы с проектом, относятся к помещениям без повышенной опасности. Это связано с отсутствием высокой температуры и влажности, токопроводящей пыли и возможности соприкосновения с заземленными предметами и металлическими корпусами оборудования одновременно.

Во время нормального режима работы с оборудованием опасность электрического поражения крайне мала, однако при использовании оборудования с поврежденной проводкой, изоляцией и/или корпусом значительно увеличивается данная вероятность.

В соответствии с ПУЭ [38] основными техническими средствами защиты от поражения электрическим током являются: основная изоляция токоведущих частей; защитное заземление или зануление; автоматическое отключение питания; защитное электрическое разделение цепей.

К работе на ПЭВМ допускаются лица, прошедшие обучение безопасным методам труда, вводный инструктаж, первичный инструктаж на рабочем месте. Требования устанавливаются согласно ТОО Р-45-084-01 [39].

5.2.5 Физические статические перегрузки

Длительная работа в неизменном положении рабочей позы связана с возникновением статической перегрузки. В целях предупреждения

возникновения профессиональных заболеваний, нарушений в работе сердечно-сосудистой, центральной нервной системы, связанных с отклонением от правил труда и отдыха, требуется изменять рабочую позу периодически, согласно индивидуальным особенностям организма человека.

Под коллективными средствами защиты в данном случае понимают установку времени для общего перерыва; разминку рабочего коллектива, согласно графику; плакаты для призыва соблюдения правил охраны труда.

5.2.6 Нервно-психические перегрузки

Руководство определяет общие положения по гигиене труда согласно рабочей среде и трудовому процессу Р 2.2.2006-05 [40].

Рабочий персонал влияет на результат собственного труда при различных уровнях сложности осуществляемой деятельности. С возрастанием сложности повышается степень ответственности, поскольку ошибочные действия приводят к дополнительным усилиям со стороны работника или всего коллектива, что соответственно приводит к увеличению эмоционального напряжения.

5.3 Экологическая безопасность

При работе с проектным решением загрязнение атмосферы не происходит, так как система управления не выделяет ядовитых веществ. Однако нагрев полимерных материалов в экструзионной установке сопровождается выделением паров составляющих компонентов ABS-пластика. Усовершенствование производства полимерной нити за счет внедрения системы стабилизации позволит снизить объем брака, тем самым уменьшив повторную переработку при изготовлении одного и того же объема продукта.

В ходе работы над проектом происходит негативное воздействие на литосферу. На всех этапах разработки системы образуются отходы разного типа. В данном случае идет речь о твердых бытовых отходах, отработанных элементах питания, поврежденных энергосберегающих лампах, отходах при пайке

электротехнических компонентов, для которых согласно действующему законодательству разрабатываются паспорта отходов.

Среди распространенных способов уничтожения отходов выделяют: складирование на полигоне; сжигание на мусоросжигающих заводах; аэробное биотермическое компостирование; утилизация.

В настоящее время в целях сохранения экологической среды проводятся программы по утилизации неисправного и устаревшего оборудования или деталей установок, при обычном захоронении которого наносится огромный вред окружающей среде.

В общих чертах процесс утилизации, как одного из наиболее эффективных способов повторного использования ресурсов, заключается в следующем:

- снятие оборудования с инвентаризационного учета учреждения;
- передача в пункты для утилизации списанного оборудования;
- оформление документации на утилизацию оборудования.

5.4 Безопасность в чрезвычайных ситуациях

Чрезвычайные ситуации (ЧС) подразделяются на конфликтные и бесконфликтные. К конфликтным ЧС относятся войны, экономические кризисы, террористические акты и др. Бесконфликтные ЧС – это техногенные и природные явления, вызывающие ЧС. К числу наиболее вероятной техногенной ситуации в условиях работы над проектом – пожар.

Пожар на производстве может возникнуть вследствие причин неэлектрического и электрического характера. К причинам неэлектрического характера относятся:

- неисправность технологического оборудования и нарушение производственного процесса;
- халатное и неосторожное обращение с огнем;
- ошибки в конструктивном решении вентиляционной системы;

- самовоспламенение или самовозгорание веществ.

Причины пожара электрического характера:

- перегрузка проводов;
- короткое замыкание;
- искрение;
- статическое электричество.

По взрывопожарной и пожарной опасности согласно СП 12.13130.2009 [41] помещения подразделяются на категории А, Б, В1, В2, В3, В4, Г, Д; здания - на категории А, Б, В, Г, Д.

В рабочем помещении присутствуют материалы, содержащие твердые горючие вещества, а также материалы, включая волокна и пыли, переходящие во взвешенное состояние. Данное помещение относится к категории В4. Для уменьшения вероятности возникновения пожара на рабочем месте проводятся следующие комплексные мероприятия противопожарной защиты:

- повышение огнестойкости здания;
- использование негорючих материалов при работе;
- использование исключительно исправного оборудования;
- проведение инструктажей по пожарной безопасности;
- разработка эвакуационных путей в соответствии с требованиями;
- организация обеспечения средств пожаротушения.

В качестве системы оповещения на рабочем месте используется речевая система оповещения. В лаборатории находится огнетушитель типа ОУ-8 для ликвидации возгораний, инструкция при возникновении пожара, имеется утвержденный план эвакуации со всеми необходимыми обозначениями.

При возникновении пожара или признаков горения работник должен немедленно прекратить выполнение работ, вызвать пожарную охрану по номеру «101» либо по номеру единой службы спасения «112», сообщив адрес, место возникновения возгорания и свою фамилию. Обесточить электрооборудование, а затем при отсутствии угрозы для жизни приступить к тушению пожара

имеющимися средствами пожаротушения. При общем сигнале опасности сотрудник обязан покинуть здание, согласно эвакуационному плану.

Вывод по разделу

В разделе были получены результаты, которые являются важными для учета при разработке, изготовлении и эксплуатации проектируемого решения. Их значимость высока, когда идет речь о социальной ответственности человека перед обществом и окружающей средой. Соблюдение правил и норм позволит снизить травматизм и даже смертность при работе с исследуемым объектом, а также сохранит окружающую среду.

Заключение

Результатами выполненной работы стало приобретение теоретических практических навыков работы при создании экспериментальной модели устройства системы стабилизации диаметра полимерной нити. Спроектирован и изготовлен каркас устройства, собраны аппаратные элементы системы. Написано программное обеспечение для работы датчика. Проведен ряд экспериментов с установлением необходимых данных по двум контурам системы. На основе них определена математическая модель системы, согласно которой синтезированы регуляторы для поддержания установленного уровня провисания и диаметра нити.

Недостаточное финансирование для создания законченного продукта, полностью отвечающего требованиям задания, мотивировало на разработку концепции стартап-проекта. В результате в качестве экономического раздела данной ВКР был представлен и защищен данный стартап-проект, который открыл возможности для получения финансирования и поддержания дальнейшего развития.

В дальнейшем предполагается завершить работы над системой, отладить ее в полной мере на оборудовании, а также внедрить систему в производство для создания базы по совершенствованию технологического оборудования по производству полимерной нити путем автоматизации процесса.

Conclusion

The results of the completed work became the acquisition of theoretical and practical skills in creating an experimental model of a device for stabilizing the diameter of a polymer filament. The frame of the device was designed and manufactured, hardware elements of the system were assembled. The software for the sensor was written to operate the system. A series of experiments were carried out with the establishment of the necessary data for the two circuits of the system. A mathematical model of the system was determined on this data. Regulators were synthesized to maintain the established level of thread sagging and thread diameter according to this model. The lack of funding to create a complete product that satisfied the requirements of the task motivated to develop the concept of a startup project. As a result, this startup project was presented as an economic section of the graduation qualification work, which opened up opportunities for obtaining funds and supporting its further development.

In the future, it is planned to complete the work with the system. It is necessary to debug it on the industrial equipment, and also embed the system into production cycle. This will create an improvement for technological equipment of filament production by automating the process.

Список использованных источников

1. Дорофеева, М.Г. Бакалаврская работа. Система управления параметром экструзионной установки: [Электронный ресурс]. URL: <http://earchive.tpu.ru/bitstream/11683/49174/1/TPU572469.pdf>. – Дата обращения: 02.02.2019.
2. Портал любителей и профессионалов, заинтересованных в 3D-печати. Технологии 3D-печати: [Электронный ресурс]. URL: https://3dtoday.ru/wiki/3D_print_technology. – Дата обращения: 12.12.2018.
3. Портал любителей и профессионалов, заинтересованных в 3D-печати. Сравнение технологий 3D-печати. Качество печати: [Электронный ресурс]. URL: <https://3dtoday.ru/blogs/igo3d-russia/technology-dlp-and-sla-and-what-is-the-print-quality>. – Дата обращения: 15.12.2018.
4. Портал любителей и профессионалов, заинтересованных в 3D-печати. Технология печати FDM и ее особенности: [Электронный ресурс]. URL: https://3dtoday.ru/wiki/FDM_print. – Дата обращения: 16.12.2018.
5. Официальный сайт компании по производству и продаже компонентов для 3D-печати Bestfilament. Мобильный экструдер: [Электронный ресурс]. URL: <https://bestfilament.ru/mobilnyy-ekstruder-dlya-proizvodstva-3d-prutka-filamentator>. – Дата обращения: 21.01.2019.
6. Аристов, А.И. Основы метрологии, стандартизации и сертификации: учебное пособие / А.И. Аристов, Т.М. Раковщик. – М., МАДИ, 2013. – 200 с.
7. Официальный сайт компании по производству и продаже экструдеров 3devo. Мобильный экструдер: [Электронный ресурс]. URL: <https://3devo.com/filament-makers>. – Дата обращения: 22.01.2019.
8. Техническая документация на фотодиодную линейку-датчик: [Электронный ресурс]. URL: https://ams.com/documents/20143/36005/TSL1401CL_DS000136_3-00.pdf. – Дата обращения: 10.11.2018.

9. Официальный интернет-магазин по продаже плат Arduino и компонентов к ней: [Электронный ресурс]. URL: <https://store.arduino.cc/usa/arduino-uno-rev3>. – Дата обращения: 30.11.2018.
10. Многофункциональный сервис поиска товаров. Технические характеристики строительного фена пистолетного типа: [Электронный ресурс]. URL: <https://www.e-katalog.ru/DWT-HLP-1500-KL.htm>. – Дата обращения: 19.12.2018.
11. Электронная энциклопедия АСУ ТП bookASUTP: [Электронный ресурс]. URL: https://www.bookasutp.ru/Chapter5_5.aspx. – Дата обращения: 16.03.2019.
12. Шишмарёв, В.Ю. Метрология, стандартизация, сертификация и техническое регулирование: учебник для студ. учреждений сред. проф. образования / В. Ю. Шишмарёв. – 6-е изд., испр. – М.: Издательский центр «Академия», 2016 – 320 с.
13. Техническая документация на плату управления фотодиодной линейки-датчика: [Электронный ресурс]. URL: <https://www.parallax.com/sites/default/files/downloads/28317-TSL1401-DB-Manual.pdf>. – Дата обращения: 10.11.2018.
14. Полищук, А.В., Новиков С.И. Настройка ПИД-регулятора систем автоматического регулирования объектов теплоэнергетического оборудования. Сборник научных трудов. Новосибирский государственный технический университет: [Электронный ресурс]. URL: <https://www.sworld.com.ua/konfer26/836.pdf>. – Дата обращения: 15.04.2019.
15. Системы цифрового управления: лабораторный практикум / А.А. Шкромадо, Р.В. Шестов, А.Н. Бирюков. – Самара: Самар. гос. техн. ун-т, 2017 – 66 с.: ил.
16. 3D Printing Filament Market. Отчет исследования рынка: [Электронный ресурс]. URL: <https://www.marketsandmarkets.com/Market-Reports/3d-printing-filament-market-267169690.html>. – Дата обращения: 01.04.2019.

17. Михаил Шишкин, Никита Гаврилов. Как делают пластик для 3D принтера – Обзор производства REC (Интервью с основателями компании REC от 29 марта 2018 года): [Электронный ресурс]. URL: <https://www.youtube.com/watch?v=PCVlgLS9cfE&feature=youtu.be&t=922>. – Дата обращения: 17.04.2019.
18. Официальный сайт компании по производству и продаже компонентов для 3D-печати Bestfilament. Каталог продукции: [Электронный ресурс]. URL: [Электронный ресурс]. URL: <https://bestfilament.ru/category/plastik-Bestfilament>. – Дата обращения: 18.04.2019.
19. Официальный сайт производителя расходных материалов для 3D-принтеров REC: [Электронный ресурс]. URL: <https://rec3d.ru>. – Дата обращения: 15.04.2019.
20. Статья-обзор лучших брендов полимерной нити 2019 года английского автора Эда Тусона: [Электронный ресурс]. URL: <https://rigid.ink/blogs/news/156667655-the-12-best-3d-printer-filament-companies-the-ultimate-review>. – Дата обращения: 20.04.2019.
21. Официальный сайт производителя и продавца 3D-пластика, изделий и принтеров MatterHackers: [Электронный ресурс]. URL: <https://www.matterhackers.com/store/c/PRO%20series%20PLA> – Дата обращения: 21.04.2019.
22. Официальный сайт производителя 3D-пластика BootsIndustries: [Электронный ресурс]. URL: <http://bootsindustries.com>. – Дата обращения: 21.04.2019.
23. Официальный сайт производителя компонентов для 3D-печати Colorfabb: [Электронный ресурс]. URL: <https://colorfabb.com/standard-black>. – Дата обращения: 21.04.2019.
24. Официальный сайт Британской Ассоциации образовательной поддержки в области 3D-печати: [Электронный ресурс]. URL: http://3dfilaprint.com/filament_overview/filaments_for_industry_engineering.htm?m

s=AA%3D%3D&st=MA%3D%3D&sct=MA%3D%3D&mw=MjQw. – Дата обращения: 22.04.2019.

25. Ресурс по подбору рекламного агентства: [Электронный ресурс]. URL: https://alladvertising.ru/info/reklama_price.html. – Дата обращения: 26.04.2019.

26. Официальный сайт Сбербанка России. Кредит на любые цели. Информация о продукте: [Электронный ресурс]. URL: https://www.sberbank.ru/ru/person/credits/money/consumer_unsecured. – Дата обращения: 30.04.2019.

27. Трудовой кодекс Российской Федерации.

28. СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03. Гигиенические требования к персональным электронно-вычислительным машинам и организации работы.

29. ГОСТ 12.2.032-78 ССБТ. Рабочее место при выполнении работ сидя. Общие эргономические требования.

30. ИС CSR 26000:2011. Социальная ответственность организации. Требования.

31. ГОСТ 12.0.003-2015 ССБТ. Опасные и вредные производственные факторы. Классификация.

32. ГН 2.2.5.3532-18. Предельно допустимые концентрации (ПДК) вредных веществ в воздухе рабочей зоны.

33. ГОСТ 12.1.003-2014 ССБТ. Шум. Общие требования безопасности.

34. ГОСТ Р 12.1.031-2010 ССБТ. Лазеры. Методы дозиметрического контроля лазерного излучения.

35. ГОСТ 12.1.019-2017 ССБТ. Электробезопасность. Общие требования и номенклатура видов защиты.

36. СН 2.2.4/2.1.8.562-96. Шум на рабочих местах, в помещениях жилых, общественных зданий и на территории жилой застройки.

37. ГОСТ 60825-1-2013. Безопасность лазерной аппаратуры. Классификация оборудования, требования и руководство пользователя.

38. Правила устройства электроустановок.

39. ТОО Р-45-084-01. Типовая инструкция по охране труда при работе на персональном компьютере.

40. Р 2.2.2006-05. Руководство по гигиенической оценке факторов рабочей среды и трудового процесса. Критерии и классификация условий труда.

41. СП 12.13130.2009. Определение категорий помещений, зданий и наружных установок по взрывопожарной и пожарной опасности.

Приложение А

(обязательное)

Листинг программы

```
void ClockPulse(){ // процедура на создание синхроимпульса
digitalWrite(CLOCKpin, HIGH);
delayMicroseconds(4);
digitalWrite(CLOCKpin, LOW);
}

void loop() { // основной цикл программы управления фотодиодной линейкой-датчиком
    digitalWrite(SIpin, HIGH); // разрешение на новое измерение
    ClockPulse();
    digitalWrite(SIpin, LOW);
    for(int i = 0; i < 128; i++){ // очистка регистра от ненужных значений
        ClockPulse();
    }
    delayMicroseconds(10); // время экспозиции
    digitalWrite(SIpin, HIGH); // запуск считывания данных
    ClockPulse();
    digitalWrite(SIpin, LOW);
    for(int i=0; i < 128; i++){ // считывание данных с 128 пикселей датчика
        delayMicroseconds(1); // задержка на фиксацию значений на АЦП
        OutAr[i] = analogRead(AnalogOutpin); // передача данных в массив для обработки
        if (i>=3){
            if (OutAr[i] < 60){ // условие, при котором датчик воспринимает объект измерения
                DiamAr[i]=OutAr[i];
                placeIDmax=i; // номер пикселя, отделяющего затемненную область от засвеченной
                countD++; // подсчет количества пикселей затемненной области датчика
            }
        }
        ClockPulse();
    }
    placeID=placeIDmax-countD/2; // расчет положения объекта относительно датчика
    D=countD*0.0635; // расчет диаметра объекта
    Serial.print(D);
    Serial.print(" ");
    Serial.println(placeID);
}
```

```

countD=0; // обнуление количества пикселей затемненной области датчика
    placeIDmax=0; // обнуление номера пикселя, отделяющего затемненную область от
    //засвеченной
}

float INTEGRAL(float IN){ // функция выполнения интегрального закона регулирования
    float OUTINT;
    OUTINT=OUTINT+IN*Disc;
    return(OUTINT);
}

float DERIVATIVE (float IN){ // функция выполнения дифференциального закона регулирования
    int j;
    float OUTDER;
    Der[j]=IN;
    if (j>1){
        OUTDER=(Der[j]-Der[j-2])/(2*Disc);
    }
    else if (j=1){
        OUTDER=(Der[1]-Der[49])/(2*Disc);
    }
    else if (j=0){
        OUTDER=(Der[0]-Der[48])/(2*Disc);
    }
    if (j==49){
        j=-1;
    }
    j++;
    return(OUTDER);
}

void timer_handle_interrupts(int timer) { // прерывания по таймеру на выработку управляющего
//воздействия регулятора
    e1=Center-placeID; // ошибка стабилизации положения объекта
    Yplace=Y_OFFSET1+Kp1*(e1+INTEGRAL(e1)/TN1+DERIVATIVE(e1)*TV1);
    e2=Diam-D; // ошибка стабилизации диаметра объекта
    Ydiam=Y_OFFSET2+Kp2*(e2+INTEGRAL(e2)/TN2+DERIVATIVE(e2)*TV2);
}

```