

Казахский Национальный Университет имени Аль-Фараби

УДК 681.51:681.7.068

На правах рукописи

ТЕРГЕУСИЗОВА АЛИЯ СОВЕТЖАНОВНА

**Разработка моделей и исследование системы управления
температурным режимом процесса вытяжки оптического волокна**

6D070200 – Автоматизация и управление

Диссертация на соискание степени
доктора философии (PhD)

Научный консультант
доктор технических наук,
профессор Айтчанов Б.Х.
Зарубежный научный консультант
Prof. Dr. hab. inz.
(доктор технических наук,
профессор) Waldemar Wojcik

Республика Казахстан
Алматы, 2024

СОДЕРЖАНИЕ

НОРМАТИВНЫЕ ССЫЛКИ.....	4
ОПРЕДЕЛЕНИЯ	5
ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ	6
1 СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ И ВОПРОСЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМ ПРОЦЕССОМ ВЫТЯЖКИ ОПТИЧЕСКОГО ВОЛОКНА.....	13
1.1 Общие характеристики технологического процесса вытяжки оптических стержней.....	13
1.2 Технологический процесс вытяжки оптических стержней как объект автоматического управления	18
1.3 Постановка задачи исследования.....	37
1.4 Выводы по разделу	38
2 РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ СИГМА ЧАСТОТНО – ИМПУЛЬСНОЙ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ ОБЪЕКТАМИ С ЗАПАЗДЫВАНИЕМ.....	40
2.1 Структурная модель Σ -частотно-импульсной системы управления объектами с запаздыванием	41
2.2 Построение эквивалентной стохастической модели сигма частотно - импульсной системы с запаздыванием	43
2.3 Построение математической модели сигма частотно – импульсной системы автоматического управления объектами с запаздыванием в виде стохастических дифференциальных уравнений Ланжевена	51
2.4 Построение математической модели сигма частотно – импульсной системы автоматического управления объектами с запаздыванием в виде стохастических дифференциальных уравнений Ито.....	54
2.5 Экспериментальное исследование модели стохастических систем с сигма частотно – импульсной системой автоматического управления для объекта с запаздыванием	57
Выводы по второй главе.....	74
3 Σ - ЧАСТОТНО – ИМПУЛЬСНАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМ ПРОЦЕССОМ ВЫТЯЖКИ ОПТИЧЕСКОГО ВОЛОКНА	76

3.1	Описание этапов технологического процесса производства вытяжки оптического волокна	76
3.2	Структура управляющей системы	86
3.3	Σ - частотно – импульсная система автоматического управления температурным режимом процесса вытяжки оптического волокна.....	89
3.3.1	Математические модели подсистемы НЦУ температурного режима вытяжки оптического волокна.....	89
3.3.2	Параметрический синтез Σ -частотно-импульсной системы управления температурным режимом процесса вытяжки оптического волокна.....	108
3.4	Устройство для измерения скорости протяжки диэлектрических нитей 111	
3.5	Разработка устройства для измерения диаметра движущихся диэлектрических нитей.....	116
	Выводы по третьей главе.....	120
	ЗАКЛЮЧЕНИЕ	121
	СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ	124
	ПРИЛОЖЕНИЕ А - Код программы simulink описания регулятора Σ - чим.....	135
	ПРИЛОЖЕНИЕ Б - Код программы разработки блока сброса в simulink .	136
	ПРИЛОЖЕНИЕ В - Патент РК на полезную модель.....	137
	ПРИЛОЖЕНИЕ Г – Акт производственных испытаний	141
	ПРИЛОЖЕНИЕ Д - Акт внедрения	146

НОРМАТИВНЫЕ ССЫЛКИ

В диссертации были приведены ссылки на следующие стандарты:

ГОСО РК 5.04.034-2011 «Государственный общеобязательный стандарт образования Республики Казахстан. Послевузовское образование. Докторантура». Основные правила заверены Министерством Образования и Науки РК. «17» июнь 2011г. №261. Астана 2011

«Инструкция по оформлению диссертаций и авторефератов», Министерство образования и культуры РК, ВАК, Алматы, 2004. МЭСТ 7.1-2003. Библиографическая запись.

ОПРЕДЕЛЕНИЯ

В настоящей диссертации применяют следующие термины с соответствующими определениями:

Оптическое волокно - нить из оптически прозрачного материала (стекло, пластик), используемая для переноса света внутри себя посредством полного внутреннего отражения.

Оптическое волокно - диэлектрическая направляющая среда, предназначенная для канализации электромагнитных волн оптического и инфракрасного диапазонов. Оптическое волокно коаксиальной конструкции и состоит из сердцевины, оболочки и первичного акрилатного покрытия и характеризуется профилем показателя преломления.

Частотно - импульсная модуляция (ЧИМ, англ. Pulse-Frequency Modulation, PFM) — вид импульсной модуляции с двухуровневым выходным сигналом, при которой частота следования выходных импульсов с постоянной длительностью является функцией входного модулирующего сигнала.

ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ

Σ - ЧИСАУ – сигма частотно – импульсная система автоматического управления;

ОВ - оптическое волокно;

ВОЭ – волоконно – оптические элементы;

ВОЛС - волоконно-оптическая линия связи – это, вид системы передачи, при котором информация передается по оптическим диэлектрическим волноводам, известным под названием "оптическое волокно";

ВТП – высоко температурная печь;

ИАССУ - Интеллектуальная автоматизированная система ситуационного управления;

СВМ - системы виртуального мониторинга;

ВА - виртуальный анализатор;

ПНЧ – приведенная непрерывная часть;

ЧИМ – частотно – импульсный модулятор;

ДЧИМ – динамический – частотно импульсный модулятор;

Σ ЧИМ – сигма частотно – импульсный модулятор;

Σ - ЧИСАУ – сигма частотно – импульсная система автоматического управления;

ПНЧ – приведенная непрерывная часть;

БС – блок сброса;

БФИ – блок формирования импульсов;

ИМ – исполнительный механизм;

ИУ – импульсное устройство;

ФЭ – формирующий элемент;

ФЗФ – формозадающий фильтр.

ВВЕДЕНИЕ

Диссертационная работа посвящена разработке математических моделей и параметрическому синтезу системы автоматического управления температурным режимом процесса вытяжки оптического волокна.

Актуальность темы. В современных условиях необходимо обеспечить надежное и качественное функционирование комплекса взаимосвязанных информационных, компьютерных и телекоммуникационных технологий. Основной средой передачи данных, на средних и дальних дистанциях телекоммуникаций, является оптическое волокно. Благодаря своим уникальным свойствам передачи, устойчивости к помехам, защищенности и относительно доступной цене, в обмен на очень хорошие прочность и устойчивость к старению оно было применено во многих областях жизни. На пути быстрого и без потерь обмена данными по оптическому волокну сталкиваются с рядом трудностей. К ним относятся: затухание, поглощение, линейное и нелинейное рассеяние и базовый предел увеличения полосы пропускания волокна, которые относятся к дисперсии. Все эти нежелательные эффекты, мы можем получить из-за некачественной вытяжки сердечника оптического волокна.

С самого начала развития волоконной оптики доминирующими проблемами оптики были стабильность диаметра исходных стержней и малого светоослабления в них. Если вторая проблема успешно решается, то проблема сверхпостоянства диаметра световодов продолжает существовать. Для ее решения необходимы постоянный контроль и управление технологическим процессом изготовления световодов.

Все факторы, оказывающие влияние на качество геометрии световода, можно свести к двум группам:

- физическое состояние стекломассы, из которой вытягивается световод;
- стабильность условий в зоне формирования световода.

Также важной задачей является – увеличение динамической точности регулирования. Низкая динамическая точность регулирования обусловлена инерционностью объекта регулирования и наличием запаздывания. Последнее определяется временем прохождения вытягиваемого стеклоизделия от зоны формирования до датчика, определяющего размеры поперечного сечения.

Построение системы автоматического управления вытяжки волокна, в свою очередь, требует построения адекватных моделей управляемого объекта. В качестве объекта управления рассматривается температурный режим вытяжки оптического волокна, который формирует заданные натяжение и диаметр вытягиваемого волокна.

Технологический процесс вытяжки оптического волокна как объекта управления характеризуется наличием нелинейности и запаздыванием, которые должны учитываться при разработке алгоритмов автоматического управления. Нелинейность статических характеристик должна быть учтена при синтезе алгоритмов управления.

Для минимизации потерь готовой продукции при вытяжке оптического волокна необходимо обеспечить нужную эффективность управления. В связи с этим разработка математических моделей и исследование системы автоматического управления температурным режимом процесса вытяжки оптического волокна, определяет актуальность выбранной темы диссертации.

Цель работы. Разработка математических моделей и исследование сигма частотно – импульсной системы автоматического управления температурным режимом процесса вытяжки оптического волокна.

Для достижения поставленной цели в работе решаются следующие задачи:

- анализ технологического процесса вытяжки оптического волокна, как объекта управления;
- разработка математических моделей сигма частотно-импульсной системы автоматического управления температурным режимом процесса вытяжки оптического волокна в виде стохастических дифференциальных уравнений Ланжевена и в форме Ито;
- экспериментальное исследование адекватности математических моделей и реальной Σ - ЧИСАУ температурным режимом процесса вытяжки оптического волокна;
- параметрический синтез сигма частотно – импульсной системы автоматического управления температурным режимом процесса вытяжки оптического волокна.

Объект исследования. Температурный режим вытяжки оптического волокна, являющийся основным контуром процесса автоматизации и основным фактором, влияющего на качество оптического стержня.

Методы исследования. Для решения поставленных задач в работе использовались методы математического анализа, теории автоматического управления и экспериментальные методы исследования объектов и систем управления.

Научная новизна работы заключается в том, что для автоматического управления температурным режимом вытяжки оптического волокна в качестве регулятора используется сигма частотно – импульсный модулятор, отличающаяся от существующих, тем, что учитывает свойство объекта в виде наличия запаздывания и ее функционирование в стохастической среде. Научная новизна работы, также, заключается в разработке математических моделей, адекватно описывающих процесс управления температурным режимом вытяжки оптического волокна. Кроме этого, диссертационная работа расширяет и углубляет теоретические представления в области математического моделирования и синтеза систем автоматического управления технологическим процессом вытяжки оптического волокна.

В диссертации получены следующие основные научные результаты:

- сформирована эквивалентная модель сигма частотно – импульсной системы автоматического управления процессом вытяжки оптического

волокна, нелинейной системы, обеспечивающей, как учет свойств объекта с запаздыванием, так и функционирование ее в стохастической среде;

- разработаны математические модели сигма частотно – импульсной системы автоматического управления процессом вытяжки оптического волокна в виде стохастических дифференциальных уравнений Ланжевена и Ито;

- осуществлен параметрический синтез сигма частотно – импульсной системы автоматического управления температурным режимом вытяжки оптического волокна, описанной в форме Ито;

- разработана сигма частотно – импульсная система автоматического управления температурным режимом процесса вытяжки оптического волокна;

- представлено устройство измерения диаметра движущихся диэлектрических нитей;

- представлено устройство измерения скорости протяжки движущихся диэлектрических нитей.

Положения, выносимые на защиту:

- построение эквивалентной и мажорирующей моделей сигма частотно – импульсной системы автоматического управления объектами с запаздыванием;

- разработка математических моделей системы в виде стохастических дифференциальных уравнений Ланжевена и форме Ито;

- экспериментальное исследование модели Σ - ЧИСАУ температурным режимом процесса вытяжки оптического волокна;

- параметрический синтез системы автоматического управления температурным режимом процесса вытяжки оптического волокна.

Теоретическая и практическая ценность:

- в результате проведенных исследований найдены зависимости влияния температуры в высокотемпературной печи на скорость вытягивания, натяжение и диаметр волокна;

- разработано и описано устройство для измерения диаметра диэлектрических нитей;

- разработано и описано устройство для измерения скорости протяжки диэлектрических нитей;

- разработана сигма частотно – импульсная система автоматического управления температурным режимом вытяжки оптического волокна. Данный тип регулятора впервые применяется в указанном технологическом процессе и считается наиболее перспективным, т.к. учитывает свойства объекта с запаздыванием.

Реализация результатов исследования:

- разработанная сигма частотно импульсная система автоматического управления температурным режимом вытяжки оптического волокна прошла научно экспериментальные, исследования и испытания в лаборатории InPhoTech – innovation photonics technology, действующей в рамках проекта «Усовершенствованная структура фотонных оптических волокон для

инновационных телекоммуникационных сетей» в Техническом Университет Марии Складовской, г.Люблин, Польша;

- разработанное устройство для измерения диаметра движущихся диэлектрических нитей прошло научно производственное испытание в лаборатории InPhoTech – innovation photonics technology, действующей в рамках проекта «Усовершенствованная структура фотонных оптических волокон для инновационных телекоммуникационных сетей» в Техническом Университет Марии Складовской, г.Люблин, Польша;

- разработанное устройство для измерения скорости протяжки движущихся диэлектрических нитей прошло научно производственное испытание в лаборатории InPhoTech – innovation photonics technology, действующей в рамках проекта «Усовершенствованная структура фотонных оптических волокон для инновационных телекоммуникационных сетей» в Техническом Университет Марии Складовской, г.Люблин, Польша;

- научные результаты диссертационной работы внедрены в учебный процесс кафедры «Автоматизация и управление», Алматинского университета энергетик и связи, по дисциплине «Нелинейные системы автоматического регулирования»;

- научные результаты диссертационной работы внедрены в учебный процесс кафедры «Телекоммуникационные сети и ситемы», Алматинского университета энергетик и связи, по дисциплине «Направляющие системы связи».

Апробация работы. Результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на следующих научных семинарах и международных научно – практических конференциях:

- семинар кафедры «Искусственный интеллект и Big Data» КазНУ им.аль-Фараби;

- семинар кафедры «Автоматизация и управление» АУЭС им.Гумарбека Даукеева;

- семинар научно – исследовательской лаборатории «Киберфизические системы и Смарт - технологии», на базе кафедры «Автоматизация и управление» АУЭС им.Гумарбека Даукеева;

- семинар Института информационных и вычислительных технологий, Комитета науки МОН РК;

- XV международной научно-практической конференции: «Естественные и технические науки в современном мире» г. Москва;

- Международная научно-практическая конференция «Современное математическое образование: опыт, проблемы, перспективы», посвященная 80-летию юбилею доктора педагогических наук, профессора Каиржана Габдуллоевича Кожабоева. Казахстан, Кокшетау, 8 июня 2018 г.;

- Төртінші өнеркәсіптік революция жағдайындағы ғылым, білім және өндіріс / Наука, образование и производство в условиях Четвертой промышленной революции /Science, education and production in the conditions

of the Fourth industrial revolution: Халықаралық ғыл.-практ. конф. Қарағанды, 2018г.;

- 5th International Conference on “Innovative Trends In Multidisciplinary Academic Research” (ITMAR- 2018), Istanbul, Turkey;

- X Международная научно-техническая конференция, Алматинского университета энергетики и связи посвященной памяти Первого ректора Гумарбека Даукеева», 18-20 октября 2018г.;

- Международная научно – практическая конференция «Theoretical and Practical aspects of research», г.София, Болгария, 2019г.;

- Международная научно – практическая конференция «Innovative Processes in modern science», г.Прага, Чехия, 2019г.;

- IV Международная научно-практическая конференция "Информатика и прикладная математика", посвященная 70-летию юбилею профессоров Биярова Т.Н., Вальдемара Вуйчика и 60-летию профессора Амиргалиева Е.Н. 25-29 сентябрь 2019, Алматы, Казахстан;

- XI Международная научно-техническая конференция «Энергетика, инфокоммуникационные технологии и высшее образование», посвященная 45-летию образования Алматинского университета энергетик и связи имени Гумарбека Даукеева, 16-18 октября 2020г.;

- International scientific journal «Global science and innovations 2020: Central Asia» Nur-Sultan, Kazakhstan, Feb-March 2020г.;

- Международная научно – практическая онлайн конференция «Современные информационные технологии и компьютерное моделирование систем», Кызылординский университет имени Коркыт Ата, Кызылорда, 06.06.2021г.;

- XVI Международная конференция по электронике, компьютерам и вычислениям (ICECCO), 25-26 ноября 2021г. Университете имени Сулеймана Демиреля, Казахстан.

Публикации. Основные результаты, проведенных исследований по теме диссертации, представлены в 31 публикации, из которых 10 – в научных изданиях, рекомендованных Комитетом по обеспечению качества в сфере образования и науки Министерства образования и науки РК, 6 – в международных научных изданиях, входящих в базу данных Scopus, 13 – в материалах международных научно – практических конференций. Получено 2 патента РК на полезную модель.

Структура и объем диссертации. Общий объем диссертации – 147 страницы. Диссертация состоит из введения, 3 разделов, заключения, списка используемых источников из 119 наименований и 5 приложений.

Во введении дано обоснование актуальности темы диссертационного исследования. Сформулированы цель работы, объект и методы исследования, раскрыта научная новизна работы, указаны положения, выносимые на защиту, представлены теоретическая и практическая значимость работы, а также реализация результатов исследования. Представлены данные по апробации результатов диссертационной работы.

Первый раздел посвящен исследованию технологического процесса вытяжки оптического волокна как объекта автоматического управления. Исследованы применяемые системы автоматического управления вытяжкой оптического волокна: ПИД регулятор, адаптивная система управления, робастно прогнозируемая система, интеллектуальная автоматизированная система ситуационного управления, а также была выполнена постановка задачи исследования.

Во втором разделе дано описание принципа действия сигма частотно – импульсной системы управления с запаздыванием. Описано построение эквивалентной сигма частотно – импульсной системы управления с запаздыванием нелинейной системы. Построены математические модели сигма частотно – импульсной системы автоматического управления объектами с запаздыванием в виде стохастических дифференциальных уравнений в виде Ланжевена и форме Ито. Приведены результаты экспериментального исследования математической модели.

В третьем разделе приведена структура управляющей системы, описана разработанная сигма частотно – импульсная система автоматического управления температурным режимом процесса вытяжки оптического волокна. Приведены математические модели управления температурным режимом вытяжки оптического волокна. Реализован параметрический синтез разрабатываемой системы автоматического управления температурным режимом процесса вытяжки оптического волокна. Представлены разработанные устройства для измерения скорости протяжки и диаметра диэлектрических нитей.

В заключении изложены основные результаты и выводы диссертации.

В приложении приведены сведения об опытных испытаниях и использовании результатов работы для практических целей. Также приведены патенты и удостоверения автора по научным изобретениям.

1 СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ И ВОПРОСЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМ ПРОЦЕССОМ ВЫТЯЖКИ ОПТИЧЕСКОГО ВОЛОКНА

1.1 Общие характеристики технологического процесса вытяжки оптических стержней

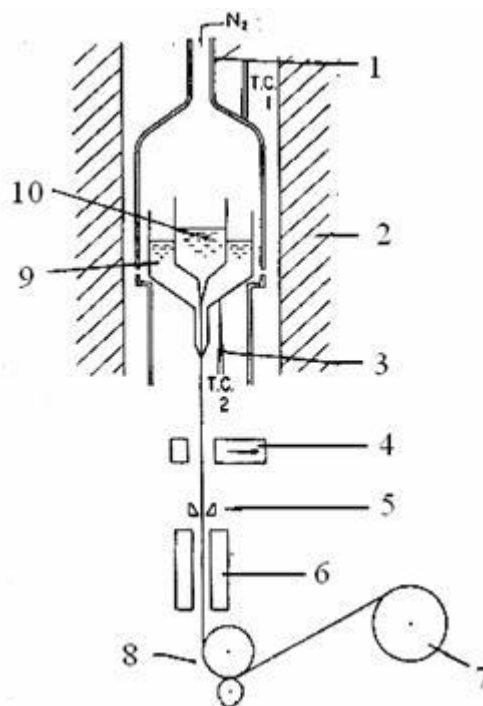
В структуру любого волоконно – оптического элемента входят одножильные или многожильные оптические волокна с определенными геометрическими, оптическими параметрами и характеристиками. Стабильность их диаметра, поддерживаемая в результате контроля в процессе изготовления, является гарантией создания высокоэффективных и взаимозаменяемых ВОЭ. Одними из основных параметров оптического стержня являются его наружный диаметр и форма поперечного сечения. Их постоянство по длине обеспечивает заданное разрешение и эффективность передачи информации в оптических приборах и волоконно-оптических линиях связи и надежность работы в качестве чувствительного элемента. Таким образом, качество ВОЭ во многом определяется точностью изготовления единичного световода.

Существующие методы производства, а именно вытяжки оптического волокна можно разделить на группы по типу передач, используемых для преобразования вращательного движения привода в поступательное перемещение вытягиваемого стержня: фрикционные, ременные, с передачей винт – гайка, с цепной передачей, с комбинацией различных передач [1].

В настоящее время, одним из основных критериев при выборе типа механизма вытяжки является способность его обеспечить высокую равномерность скорости вытягивания, поэтому выделим два самых распространенных и эффективных метода изготовления, т.е. вытяжки оптического волокна. Это метод двойного тигля и метод вытяжки из заготовки, или как еще называют, преформы [2].

Метод двойного тигля

Сердцевина оптического волокна и оболочка создаются одновременно, путем отдельной плавки в двойном тигле. Тигель имеет резервуар для плавления сердцевины из стекла, оставляя небольшое отверстие в центре, и один (или несколько), резервуаров для остекления. Таким образом, данный метод производства позволяет получить после вытяжки необходимый профиль показателя преломления. Схема установки для вытяжки ОВ методом "двойного тигля" приведена на рисунке 1.1 [3-6].



1 – экран из кварцевого стекла, 2 – печь, 3 – термопары, 4 – измеритель диаметра волокна, 5 – фильера с материалом покрытия, 6 – печь для полимеризации покрытия, 7 – приемный барабан, 8 – тянущие ролики, 9 – стекло оболочки, 10 – стекло сердцевины

Рисунок 1.1 - Вытяжка волокна из многокомпонентного силикатного стекла методом «двойного тигля»

Установка состоит из двух concentric вставленных друг в друга тиглей, в которые загружены стекла, формирующие сердцевину (внутренний тигель) и оболочку (наружный тигель). Тигли помещены в печь, температура в которой контролируется термопарой. Ниже установлен измеритель диаметра волокна, фильера с материалом защитно - упрочняющего покрытия, термопечь или УФ-облучатель для полимеризации термо- или УФ- отверждаемого покрытия, тянущие ролики и приемный барабан для волокна. Защитное полимерное покрытие необходимо наносить сразу же во время изготовления оптического волокна, потому что оно защищает его от воздействий внешней среды, от загрязнений, микро и макро трещин, придает вытянутому волокну исключительную гибкость и способность выдерживать без разрушения многократный изгиб [7].

Отношение радиусов сердцевины $r_{\text{сер}}$ и волокна $r_{\text{вол}}$, включающего в себя сердцевину и оболочку, находится из соотношения:

$$\frac{r_{\text{сер}}}{r_{\text{вол}}} = \sqrt{\frac{Q_c}{Q_c + Q_{\text{об}}}} \quad (1.1)$$

где $Q_c = \iint_C (\vec{v}_c, \vec{n}) ds$ и $Q_{об} = \iint_{об} (\vec{v}_{об}, \vec{n}) ds$ - объёмные скорости потоков стекол сердцевины и оболочки соответственно, которые в свою очередь зависят от плотности и вязкости стекол при температуре вытяжки, от радиусов фильер в тиглях и уровня стекол в них и т.д. Диаметр волокна определяется из баланса масс вытекающего стекла и количества вытянутого волокна, т.е.:

$$r_{вол} = \sqrt{\frac{(Q_c + Q_{об})}{(\rho v_T)}} \quad (1.2)$$

где v_T - скорость вытяжки волокна.

На практике получение ОВ с малыми потерями методом "двойного тигля" (как в прочем и любым другим методом) требует очень внимательного отношения к деталям на каждой его стадии. К достоинствам данного метода можно отнести тот факт, что волокна могут быть сколь угодно большой длины. Не нужно подготавливать заготовки. Однако, этот метод менее пригоден для получения сверхчистых волокон с очень низкими потерями, так как трудно избежать загрязнения материала из тигля [8].

Наиболее распространенными и дающими волокно высокого качества, являются методы, основанные на использовании преформ. Преформа - это стеклянный стержень диаметром от 1 до 10 сантиметров и длиной примерно 1 метр. Вдоль оси преформы (заготовки) расположена область с увеличенным показателем преломления. Из нее и будет формироваться сердцевина волокна. Профиль стержня представляет расширенный профиль оптического волокна. После интенсивного локального нагрева, волокно вытягивают из этой заготовки. Оно то же, сразу же покрывается слоем полимера в несколько микрон толщиной для механической защиты. После чего происходит процесс вытягивания на башне вытяжки. Эта установка, около 7 метров, возможно до 10 метров высотой и довольно сложной конструкцией, с точными измерениями и контролем технологий. Механизм подачи передает заготовку в зону вытяжки с печью сопротивления или горелкой. Покидая эту зону, волокно измеряется и значения измерений передаются в систему управления. Время отклика не должно быть больше, чем 0.1-0.03с, а результирующий диаметр отклонения от требуемых значений не должно превышать 2%. Длина зоны перетяжки зависит от скорости вытяжки. Скорость вытяжки машина выбирает на основе информации о диаметре волокна. Последний компонент линии - устройство для намотки, после которого иногда ставят устройство для проверки волокна на прочность. Волоконно-вытягивающие линии могут содержать дополнительные устройства, которые упрощают операции вытяжки или делают их более точными [9].

Так как, данный метод обеспечивает производство оптического волокна высокого качества и является самым распространенным методом,

исследование системы управления температурным режимом вытяжки оптического волокна будет сконцентрировано на данном способе вытяжки [10].

Этап изготовления заготовки

Методы изготовления заготовки (преформы) детально описаны в [11]. Заготовка сердцевины определяет качество и эксплуатационные характеристики волокна и поэтому является его важной частью. К известным процессам изготовления сердцевины относятся следующие: Метод парофазного осевого осаждения - Vapour Phase Axial Deposition - VAD, Метод внешнего парофазного осаждения - Outside Vapour Deposition - OVD, плазмохимические методы - Plasma Chemical Vapour Deposition – PCVD и Модифицированный метод химического парофазного осаждения - Modified chemical vapor deposition method (MCVD) [12].

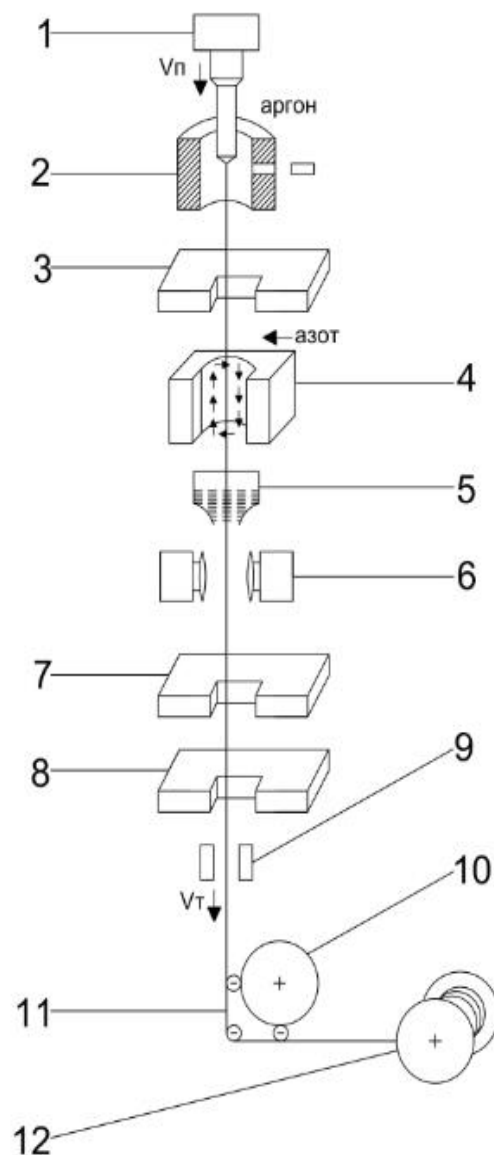
Качество изготовленных преформ в большой мере определяется свойствами исходных материалов, и существующее технологическое оборудование не нуждается в дополнительных средствах автоматизации управления.

Готовая стержневая заготовка (независимо от способа ее изготовления) вытягивается в волокно. Размягченное таким образом стекло может вытягиваться под действием собственной силы тяжести, внешних растягивающих усилий или выдавливаться из замкнутого объема [13].

Этап вытяжки волокна из заготовки на технологической установке

Большое влияние на качество оптического волокна оказывает второй этап - вытяжка волокна из заготовки на технологической установке, которую называют башней вытяжки.

В технологический процесс вытяжки оптического волокна входят следующие операции: нагрев заготовки с плавлением его нижнего конца и формированием зоны перетяжки, вытяжка волокна из зоны перетяжки, контроль и поддержание диаметра и натяжения вытягиваемого волокна, нанесение слоя лакового покрытия, контроль и поддержание нужной толщины покрытия, его «запекание» и прием на катушку готового волокна [14].



1 – механизм подачи заготовки, 2 – высокотемпературная печь, 3 – оптический пирометр, измеряющий $T_{ВТП}$, 4 – бесконтактный лазерный измеритель диаметра, 5 – камера охлаждения, 6 – узел наложения защитного лакового покрытия, 7 – ультрафиолетовая печь полимеризации лакового покрытия, 8 – лазерный измеритель диаметра волокна по лаковому покрытию, 9 – измеритель эксцентриситеты (толщины) лакового покрытия, 10 – устройство измерения натяжения волокна (бесконтактное устройство измерения скорости протяжки), 11 – тяговое устройство, 12 – приемная катушка с датчиком длины вытянутого оптического волокна

Рисунок 1.2 - Функциональная схема башни вытяжки оптического волокна

1.2 Технологический процесс вытяжки оптических стержней как объект автоматического управления

Изготовление оптического волокна представляет собой сложный технологический процесс с большим числом управляемых и контролируемых параметров. Оборудование, используемое при промышленном производстве волокна, должно обеспечивать не только качество оптического волокна, но и высокую производительность самого производства. Необходимо знать характеристики и уметь оценивать влияние всех значимых факторов на качество вытягиваемого волокна. Прежде всего, это касается основных технологических параметров: температуры разогрева стекломассы, скорости подачи стекла в зону нагрева, скорости и усилия вытяжки световода. Волоконные детали с высокой разрешающей способностью можно получить только при использовании световодов с одинаковой геометрией. Отклонения отдельных элементов геометрии (диаметра, формы поперечного сечения, размеров и т.п.) приводит к снижению частотно-контрастных характеристик детали, появлению микроструктурного шума и различного рода дефектов в рабочей зоне деталей. Все это делает необходимым разработку автоматизированной системы контроля и управления установкой вытяжки оптического волокна [15,16].

Следует заметить, что одним из основных источников в рассматриваемой области, послуживший базисом настоящего исследования, является исследование Б.Х. Айтчанова, А.С. Тергеусизовой, в котором описан процесс вытяжки оптического стержня с приведением типового устройства, а также принятые в отрасли технологии производства оптических телекоммуникационных волокон. Рассмотрен процесс вытяжки оптического волокна, как объект автоматизированного управления и варианты решения данной задачи. В частности, подчеркивается, что качество процесса вытяжки зависит главным образом от конструкции печи, технологии наложения оболочки и оптимального контроля параметров процесса, таких как натяжение, температура, диаметр и скорость. Автоматизированное управление процессом вытяжки сводится к процессу принятия решений по обеспечению продукции заданного качества.

По данным исследований, одним из основных технологических режимов, влияющих на качество вытяжки, является температурный режим. В работе дано применение динамических частотно-импульсных систем автоматического управления объектами с запаздыванием.

В работе Д.Б. Чостковского «Структурный синтез системы управления процессом вытяжки градиентных оптических волокон», башня вытяжки оптического волокна рассмотрена как объект управления. Выявлены управляющие и возмущающие воздействия. Предложена система управления башней вытяжки, которая обеспечивает необходимую эффективность управления как в стационарном режиме вытяжки, так и в переходных

режимах, когда без остановки башни меняется скорость подачи преформы [17].

Научный интерес представляет и работа Р.Ш. Галиуллина «Идентификация и автоматическое управление технологическим процессом вытяжки оптического волокна». Ученым предложена методика и условия идентификации технологического процесса вытяжки оптического волокна как объекта автоматического управления, модель которого можно представить в форме Гаммерштейна. По экспериментальным данным получены математические модели и структурное представление процесса вытяжки оптического волокна, как объекта управления диаметром и натяжением вытягиваемого волокна. На основе полученных математических моделей разработаны алгоритмы оптимального управления процессом вытяжки оптического волокна, позволяющие получить максимальную точность диаметра вытягиваемого волокна в нестационарном и стационарном режимах вытяжки в условиях влияния тренда диаметра преформы. Получены аналитические зависимости оптимальных настроек цифрового регулятора системы автоматического управления натяжением вытяжки, обеспечивающие заданное значение натяжения в условиях возмущения по скоростям вытяжки, подачи преформы и её диаметру [18].

Исследование А.А. Пестерева «Оптимальное управление подвижным источником теплового воздействия при легировании заготовок кварцевых оптических волокон» получены новые результаты по оценке влияния параметров подвижного теплового источника на распределение температуры кварцевой трубы, что позволяет снизить погрешности расчет технологических режимов процесса MCVD. Кроме того, ученым разработана и внедрена оригинальная методика расчета температурных режимов процесса MCVD, отличающаяся учетом эффективной температуры, что позволяет рассчитывать компенсирующие сигналы и, тем самым, вносить корректировку в систему управления станка MCVD. При этом предложен способ управления температурным полем объекта управления с учетом его распределенных параметров, что позволяет оптимизировать процесс стабилизации температурного поля, а также алгоритм оптимального стабилизирующего управления, отличающийся наличием блока вычислений оптимального процесса, что позволяет стабилизировать температурное поле в режиме реального времени [19].

В работе В.П. Первадчука, Д.Б. Владимировой, И.В. Гордеевой «Оптимальное стабилизирующее управление процессом вытяжки оптического волокна в условиях неизотермичности» рассмотрена задача оптимального стабилизирующего управления процессом вытяжки оптического волокна. Математическая модель, описывающая данный процесс, является системой дифференциальных уравнений в частных производных относительно функций радиуса волокна, его скорости и температуры. В целях оптимизации производственного процесса вытяжки важно и актуально осуществлять управление рядом параметров в режиме реального времени. К числу таких

параметров можно отнести температуру печи и скорость намотки готового волокна. При этом важно, чтобы другие параметры процесса (например, его геометрические характеристики) были стабильными [20,21].

В другой схожей работе «Стабилизирующее управление распределенной системой в задачах вытяжки кварцевых оптических волокон в условиях неизотермичности» предлагается новый подход к решению задачи оптимального стабилизирующего управления технологическим процессом вытяжки кварцевых оптических волокон. Задача оптимального управления этим процессом формулируется как задача управления распределенной системой. Сформулирована задача оптимизации геометрической формы волокна при управлении скоростью вытяжки волокна в условиях неизотермичности. С помощью аналога метода Лагранжа получены система оптимальности в форме дифференциальной задачи в частных производных, а также формула для нахождения функции оптимального управления в явном виде. Для получения системы оптимальности использованы свойства выпуклости, полунепрерывности снизу и коэрцитивности целевого функционала [22].

Кроме того, системам автоматического управления процессам вытяжки оптического волокна посвящены и другие работы ученых: А.Ю. Беленкова «Автоматизация технологического процесса получения преформ для вытяжки оптического волокна с помощью технологий дополненной реальности»; А.Н. Труфанова «Термомеханические процессы в специальных оптических волокнах при их производстве и эксплуатации», Ю.И. Лесниковой «Математическое моделирование термовязкоупругого поведения оптических волокон типа PANDA и его конструктивных элементов», Т.В. Соколовой. «Исследование и разработка двумерной системы управления процессом формирования оптических волокон на базе интеллектуальных сервоприводов» и прочих российских исследователей [23,24].

Особо следует подчеркнуть работу ведущего специалиста американской компании AMP Дональда Дж. Стерлинга «Волоконная оптика», используемую по всему миру. Американский ученый на основе личного опыта описывает процесс вытяжки оптического волокна, делая акцент на автоматизации данного процесса. В частности, исследователем также делается вывод о важности температурного режима и его влиянии на качество вытяжки [25].

Представляет интерес и обширная работа в данной области американского ученого R. Hui «Introduction to fiber-optic communications», в которой подробным образом исследуется процесс автоматизации вытяжки оптоволокна [26].

Анализ линейной стабильности неизотермической вытяжки содержится в еще одном труде: «Linear stability analysis of nonisothermal glass fiber drawing», написанном J. Philippi, M. Bechert, Q. Chouffart, C. Waucquez, B. Scheid. Американские ученые отмечают, что охлаждение может оказывать сильное стабилизирующее воздействие на нестабильность резонанса вытяжки. В исследовании приводится подробный анализ, охватывающий влияние

инерции, гравитации, поверхностного натяжения и температуры. Доказывается, что максимальная критическая степень вытяжки для вытяжки волокна может быть на два порядка ниже, чем для задачи литья пленки, когда коэффициент теплопередачи предполагается постоянным. Исследуются пять контрольных параметров: коэффициент вытяжки, соотношение сторон волокна, температура на входе, коэффициент конвективной теплопередачи и жесткость при неоднородной температуре окружающей среды [27].

Исследованию систем управления процессом вытяжки посвящена работа украинского исследователя Е.А. Низяева «Моделирование системы автоматического управления процессом вытяжки микроструктурированного оптического волокна». Автор исследования подчеркивает, что в процессе вытяжки необходимо тщательно контролировать структуру волокна, температуру и давление, при которых происходит процесс. Даже при малейших отклонениях от необходимых параметров происходит необратимая деформация участка волокна, что приводит к большим экономическим потерям. Исходя из этого, Е.А. Низяевым разработано приложение, позволяющее моделировать и визуализировать процесс вытяжки волокна из заготовки. С его помощью можно определить следующие параметры о протекании процесса вытяжки оптоволокна: интенсивность оптического поля в сечении; диаметр внутренних и внешних капилляров; изменение интегрального показателя во времени; температура, при которой протекает процесс [28].

Таким образом, указанные и другие исследования послужили теоретическим базисом в изучении особенностей управления температурой процесса вытяжки оптического волокна.

Параметры режима вытяжки, задаваемые конкретно для каждой вытягиваемой преформы, а именно, сочетание скорости вытяжки и её натяжения, обеспечивает ту форму зоны перетяжки, при которой складываются заданные характеристики вытягиваемого волокна. Основные управляющие факторы – температура в печи и скорость вытяжки. Стабилизация натяжения осуществляется путем регулирования температуры ВТП по величине ошибки контура стабилизации натяжения. Эксплуатационные характеристики вытягиваемого волокна (коэффициент затухания и коэффициент хроматической дисперсии) обеспечиваются точным соблюдением натяжения вытяжки, которое задается конкретным для каждой вытягиваемой преформы и скорости вытяжки, а они в свою очередь обеспечиваются поддержанием необходимой температуры в ВТП. Это определяет актуальность темы исследования диссертационной работы [29].

Объектом управления является температура в высокотемпературной печи плавления кварцевого стекла, в зоне перетяжки. Целью управления является вытяжка волокна заданного диаметра d_0 , при поддержании заданного режима вытяжки, конкретного для каждой вытягиваемой преформы - скорости вытяжки v_T и натяжением вытяжки F_0 . При этом управление диаметром осуществляется малым изменением скорости вытяжки v_T , а управление

натяжением - малым изменением температуры T_0 высокотемпературной печи. Для реализации оптимального управления необходимо знание математической модели объекта. Соответственно, параметрами процесса будут геометрическая форма заготовки, скорость ее подачи в печь, температура в высокотемпературной печи, скорость вытяжки и диаметр кварца готового волокна. Последний параметр является целевым, поскольку удержание диаметра в требуемом диапазоне является необходимым условием получения качественного волокна [30].

Автоматизированное управление процессом вытяжки сводится к процессу принятия решений по обеспечению продукции заданного качества. Процесс вытяжки рассматривают как объект управления, включающий устройство вытяжки (управляющее устройство) и зону формирования оптоволокна (объект управления) (рисунок 1.3).

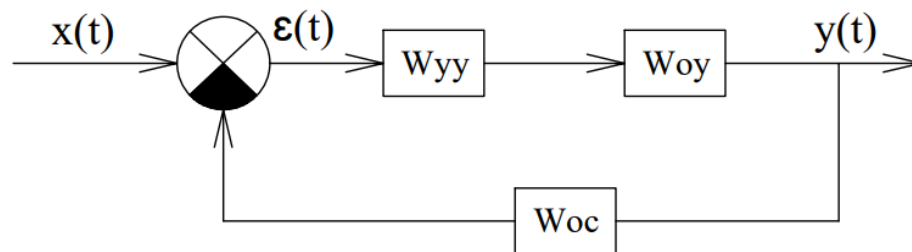


Рисунок 1.3 - Схема автоматизированного управления вытяжкой оптического волокна

Управление регулируемой величиной $y(t)$ (диаметр оптического волокна, температура в высокотемпературной печи, усилие вытяжки и т.п.) происходит в соответствии со значениями передаточных функций объекта управления W_{oy} и управляющего устройства W_{yy} . По каналу обратной связи формируется значение передаточной функции W_{oc} - задающее воздействие (напряжение, скорость барабана двигателя катушки), $x(t)$ определяет сигнал рассогласования - $\varepsilon(t)$, в соответствии с которым процесс вытяжки обеспечивает заданные характеристики производимой продукции.

Применяемые САУ вытяжкой оптического волокна

ПИД регулятор. Управление вытяжкой оптического волокна на основе широко распространенных ПИД регуляторов, показывает, что управление исходным сигналом производится без предварительной обработки сигнала. Из-за наличия высокочастотных возмущений необходимо исключить дифференциальное звено регулятора. Также при управлении сигналом возникает проблема запаздывания реакции на возмущения сигнала, как бы точно не была настроена система ПИД – регулирования. Колебания сигнала имеют существенно большую частоту по сравнению со временем реакции управления. На рисунке 1.4 и 1.5 представлены исходный сигнал и сигнал после обработки ПИД – регулятором. Низкочастотные возмущения сигнала

быстро гасятся регулятором, но из-за запаздывания управляющего воздействия амплитуда высокочастотных колебаний увеличивается [15, с.112, 16, с.502.]. Так, можно сделать вывод, что ПИД – регулятор эффективен для регулирования низкочастотных колебаний, но при воздействиях на высокочастотные колебания может порождать дополнительные шумы в сигнале [31].

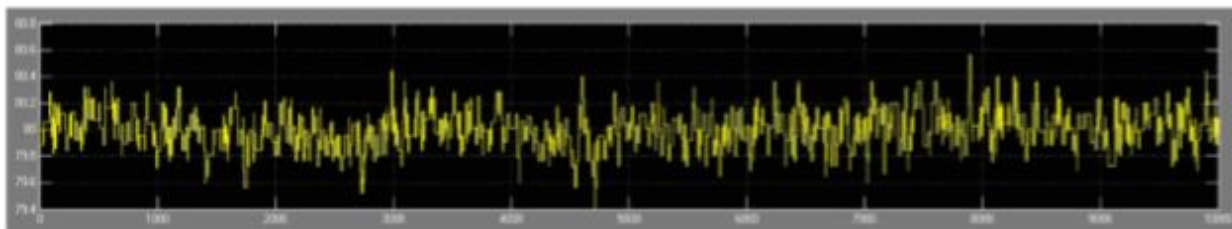


Рисунок 1.4 – Сигнал до управления

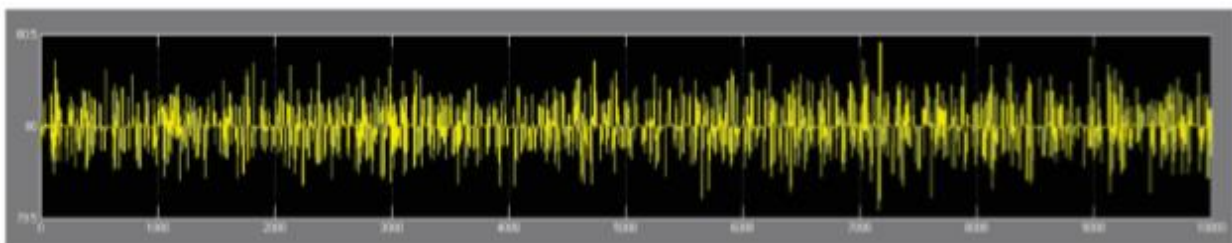


Рисунок 1.5 – Сигнал после управления

Если применять ПИД регулятор для регулирования температуры в высокотемпературной печи вытяжки оптического волокна, имеет место быть, так называемый, процесс «перерегулирования» управляющего регулятора. ПИД является механизмом обратной связи в контуре управления, которым необходимо жестко управлять. Когда вход пирометра отличается от заданного значения температуры, ПИД обеспечивает коррекцию подаваемого напряжения. То, как запрограммирован ПИД, определяет скорость коррекции. Слишком быстрое изменение обычно вызывает колебание температуры. Допустим, мы установили температуру на 2100°C градусов, но ПИД регулятор не оптимизирован. Когда температура падает до 2099 градусов по Цельсию, ПИД увеличивает напряжение, подаваемое на катушку. Температура поднимается до 2110°C градусов. ПИД регулятор реагирует путем восстановления заданной температуры и уменьшает подаваемое напряжение. Сейчас температура резко падает до 2090°C градусов. Дифференциальный зазор увеличился с резкими колебаниями температуры [31, с.75].

При использовании данной системы управления, оператору необходимо акцентировать внимание на важности качественной настройки управляющего контура. Его оптимальные параметры выстраиваются в зависимости от характера колебаний сигнала и времени запаздывания управления. Настройка

контроллера ПИД регулятора, это итеративная процедура, которая, в связи с вышеперечисленными недостатками, может отнимать много времени. Оптимальность автоматического управления процессом вытяжки может быть обеспечена включением идентификатора в структуру системы управления [32].

Адаптивная система управления. Использовать адаптивную модель управления процессом вытяжки предлагается в [18, с.64]. Коэффициенты управляющей функции подбираются на основе анализа текущего состояния процесса. Проводится идентификация текущего состояния процесса, измеряемая величина диаметра волокна $D(t)$ представляется в виде разложения в ряд по ортогональной системе функций $\{\varphi_n(t)\}_{n=1}^{\infty}$:

$$D(t) = \sum_{n=0}^{\infty} C_n \varphi_n(t) \quad (1.3)$$

В связи с объективно существующим запаздыванием управляющей функции по отношению к изменениям целевого параметра, к неуправляемым отнесли те возмущения, частота которых ν превышает значение:

$$\nu_0 = a_0 \frac{1}{T}, \quad (1.4)$$

где a_0 – константа, не превосходящая единицы; T – период запаздывания.

Численный анализ в [18, с.68] показал, что для представления диаметра в виде (1.3) не требуется значительного числа слагаемых. Изменение значений коэффициентов производится при условии значимого изменения параметров процесса вытяжки. Представляется, что предложенный подход устраняет возможное негативное влияние системы управления на качество продукции [33].

Робастно прогнозируемая система. Робастно прогнозируемую систему управления процессом вытяжки оптического волокна предлагают в [34] с применением предиктора Смита. Цель данного подхода, предсказать величину сигнала на выходе объекта до того, как он там появится на самом деле. За счет этого предсказания из модели пытаются исключить величину запаздывания, что дает возможность прогнозирования объекта до момента появления сигнала на выходе. Структурная схема предиктора Смита представлена на рисунке 1.6.

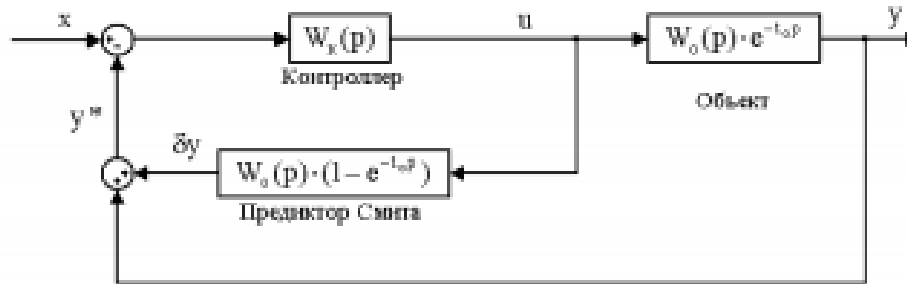


Рисунок 1.6 – Структурная схема предиктора Смита

Предиктор Смита имитирует разницу между моделью процесса с зоной нечувствительности и реальным объектом. Этот корректирующий сигнал добавляется к измеренному выходному сигналу, чтобы предсказать, какой сигнал был бы на выходе, если бы не было запаздывания. Рассматривается прогнозируемый алгоритм управления диаметром оптического волокна. Такой подход требует высокой точности идентификации технологического процесса. Также, закон предиктивного управления, это замкнутая система. Тогда как динамика свойств объекта, включает в себя разомкнутые системы. Как следствие, реакция системы с замкнутым контуром, не быстрее, чем с разомкнутым контуром. Это недостаток данного подхода управления [34, с.112].

Интеллектуальная автоматизированная система ситуационного управления (ИАССУ). В источнике [35] автоматизированную систему процесса вытяжки оптического отождествляют с интеллектуальной автоматизированной системой ситуационного управления (ИАССУ). Существенным отличием ИАССУ от традиционных АСУ является принцип работы блока математических моделей - «М». Задачи из «М» решаются по запросу из базы знаний, при необходимости генерации соответствующих новых знаний и данных. Это может быть обеспечено наличием в базе фреймов, описывающих знания о математических моделях, условиях их применения и выходных данных, получаемых при решении.

Поиск решений в ИАССУ обеспечивается блоком анализа ситуаций «S» и блоком вывода управляющих решений - «Y», которые составляют двухэтапную процедуру смыслового, или логического, вывода, реализуемого в блоке вывода «R». Выделение процедур вывода управляющих решений и анализа ситуаций в самостоятельные блоки дает возможность программно реализовать в ИАССУ различные стратегии вывода решения.

В перспективе реализация рассмотренной выше системы в полном объеме позволит передать автоматизированной системе значительную часть функций по подбору параметров и режимов, управлению и оптимизации технологического процесса вытяжки ОВ. Отметим, что ИАССУ в полном объеме в реальных технологических процессах пока не реализовано, тем не менее, представляет собой весьма перспективный метод автоматизации процесса вытяжки световодов [35, с.928].

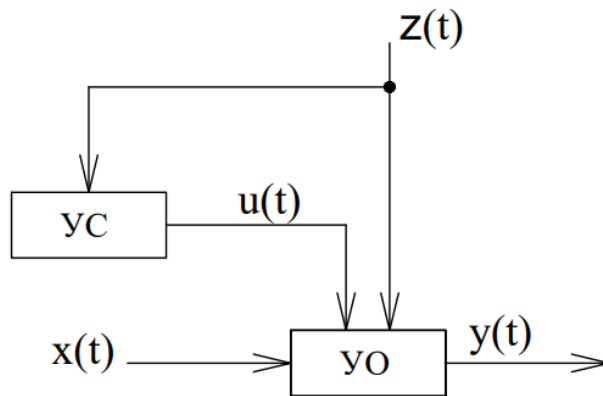


Рисунок 1.8 - Система управления по возмущению

На рисунке обозначено: ОУ - объект управления; УС - управляющее устройство; $x(t)$ - управляющая команда (вход, например, температура печи, скорость вытяжки); $y(t)$ - регулируемая величина (выход, диаметр оптического волокна); и $u(t)$ - управляющее воздействие. При таком управлении контролируется параметр $u(t)$ (например, усилие вытягивания), который мгновенно реагирует на изменения, происходящие внутри самого объекта управления, в этом состоит основное преимущество такой структуры управления [38, 39].

Структура управления по отклонению изображена на рисунке 1.9.

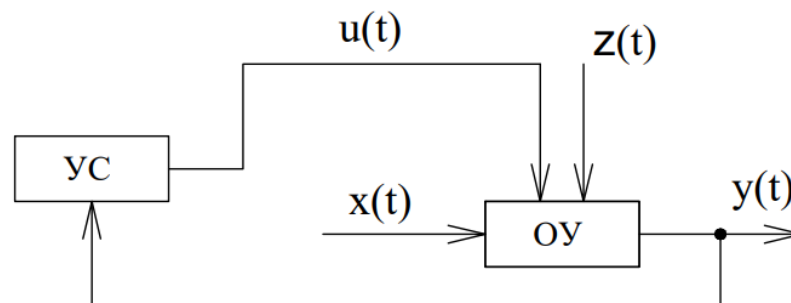
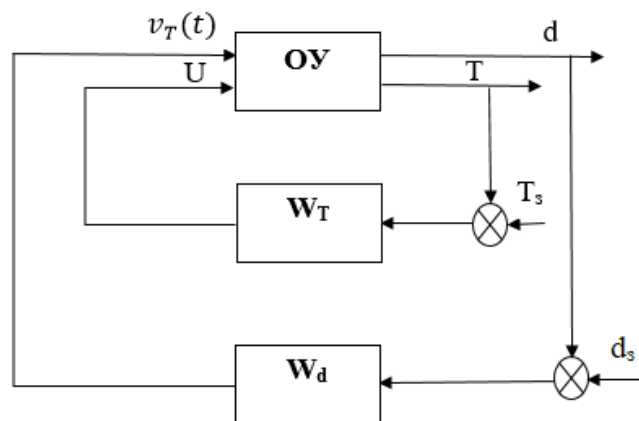


Рисунок 1.9 - Система управления по отклонению

Для такой структуры управления осуществляется постоянный контроль выходного параметра $y(t)$. Управление формируется по результатам контроля. В обоих случаях возникает проблема транспортного запаздывания. То есть информацию о состоянии объекта управления невозможно получить в режиме реального времени. Следовательно, необходимо устанавливать зависимости, позволяющие определять состояние объекта управления в определенные последующие моменты времени, если известны управляющие и возмущающие воздействия в предыдущие моменты [40].

Путем эксперимента и проведенных измерений идентифицированы следующие входные и выходные параметры. Входящие параметры: $v_n(t)$ -

скорость подачи преформы, U - напряжение нагревательного элемента высокотемпературной печи, P - питание и позиционирование фильеры покрытия лаком. $v_T(t)$ – скорость привода тяги. Выходящие параметры: $T_{ВТП}$ - температура высокотемпературной печи, d - диаметр оптического волокна, после процесса плавления в печи, D - диаметр волокна по лаковому покрытию, P_S - натяжение оптического волокна (или скорость протяжки), L - длина оптического волокна.



ОУ – объект управления, d – диаметр оптического волокна, d_3 – заданный диаметр оптического волокна, T - температура высокотемпературной печи, T_3 - заданная температура высокотемпературной печи, U – напряжение подаваемое на медную катушку печи, $v_T(t)$ – скорость протяжки или натяжение оптического волокна (привод тяги), W_T – регулятор (сигма частотно – импульсная система стабилизации) температуры высокотемпературной печи, W_d – цифровой регулятор диаметра волокна.

Рисунок 1.10 – Схема автоматизированного управления вытяжки оптического волокна

На рисунке 1.11 показана структура системы управления вытяжкой оптического волокна [41].

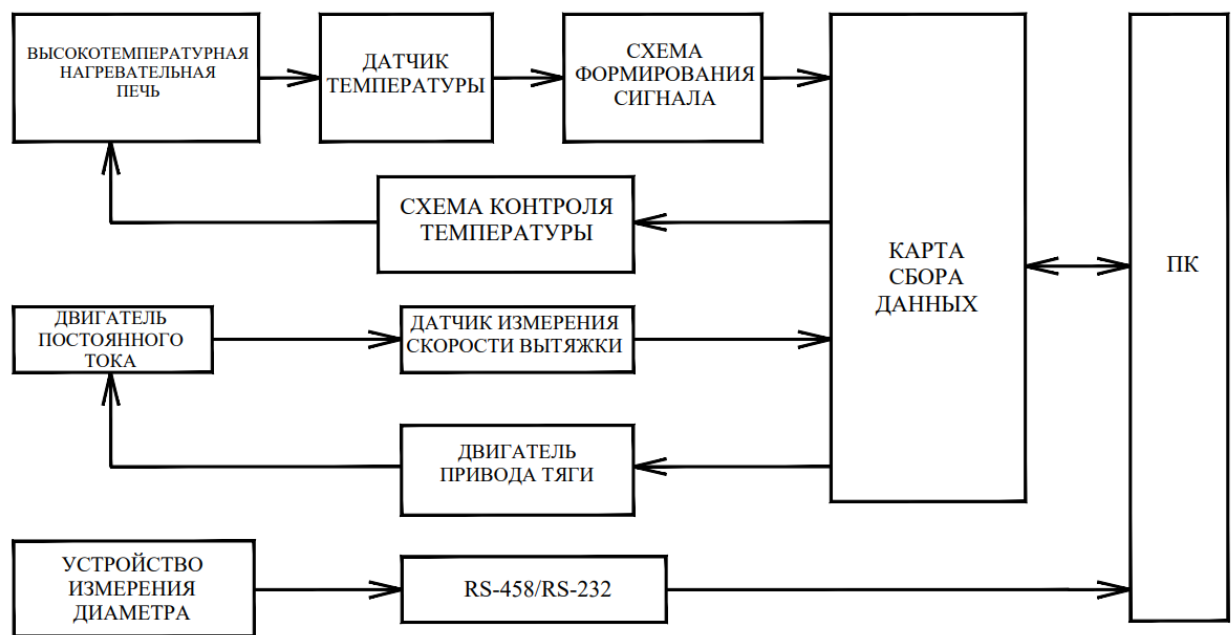


Рисунок 1.11 - Структура системы управления вытяжкой оптического волокна

Аппаратное обеспечение системы в основном включает в себя датчик температуры, управление двигателем, схему формирования сигнала, карту сбора данных, лазерный датчик диаметра, схему управления температурой и двигателем.

Особенностью технологического процесса вытяжки оптического волокна является наличие существенного запаздывания. Оно определяется временем прохождения вытягиваемого стеклоизделия от зоны формирования до датчика, определяющего размеры поперечного сечения. Наличие запаздывания в технологическом процессе приводит к тому, что сигнал на выходе объекта в течение некоторого времени после изменения входного сигнала остается неизменным. В связи с этим, важной задачей является – увеличение динамической точности регулирования. Низкая динамическая точность регулирования обусловлена инерционностью объекта регулирования [42].

Выявим характерные особенности технологического процесса вытяжки оптического волокна. К ним можно отнести следующие факторы:

- Технологический процесс, происходящий в агрегатах башни вытяжки, является сложным. Например, регулирование температуры в печи происходит от изменения напряжения подаваемого на индукционную катушку и зависит от теплообмена (излучения, конвекции, теплопроводности) и химической реакции в преформе (заготовке) оптоволокна (плавление стекла/легированного материала).

- Физическая сложность, многофакторность процессов, происходящих в устройствах вытяжной башни, приводят к тому, что они являются многосвязными объектами, функционирование которых определяется рядом

входных и выходных величин, испытывающих взаимное влияние. Например, температура в печи влияет на скорость протяжки и силу натяжения оптического волокна и в итоге на его диаметр, а в обратной связи на скорость подачи преформы.

- Наличие запаздывания и инерционность объекта, вызванного временем прохождения вытягиваемого стеклоизделия от зоны формирования до датчика, определяющего размеры поперечного сечения.

- Наличие возмущений, вызывающих изменение управляемых величин. Эти возмущения делятся на детерминированные (режим разгона установки вытяжки оптического волокна, выход установки на рабочий режим, запланированные изменения режима технологических процессов, режим пуска и остановки) и случайные (вязкость стекломассы, непредвиденные условия теплообмена, химические процессы происходящие в заготовке оптоволокна).

- Наличие ограничений на управляющие воздействия и выходные величины.

- Высокий уровень помех при измерений некоторых переменных (контактное измерение или сложности возникающие при бесконтактном измерении параметров оптического волокна), связанные с несовершенством соответствующих датчиков.

Таким образом, рассмотренный технологический процесс, как объект управления характеризуются:

- многомерностью, т.е. наличием большого числа управляемых переменных;

- стохастическим характером возмущающих воздействий на процесс в виде отклонений и непредвиденных реакций в составе и качестве заготовки, т.е. неоднородность свойств заготовки, вязкости стекломассы, а также случайность входных параметров (колебания напряжения и тока подаваемого на нагревательный элемент, колебания температуры печи, колебания скорости подачи заготовки и скорости вытяжки);

- значительной инерционностью процессов и наличием запаздывания [43].

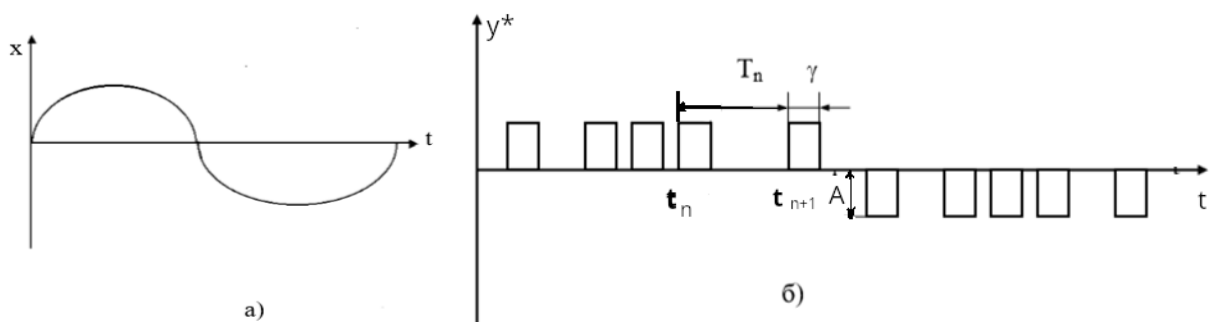
Наличие запаздывания является серьезным препятствием при разработке высококачественных и высокоэффективных систем управления технологическим процессом вытяжки оптического волокна. Применение оптимальных по быстродействию регуляторов для подобного технологического процесса, часто затруднено наличием в данных процесса запаздывания, существенно снижающего динамические показатели системы управления.

Как видно из вышеуказанного, задача качественного управления технологическим процессом вытяжки оптического волокна, которое обладает запаздыванием, представляет значительный теоретический и практический интерес.

Для решения задачи регулирования температуры, процесса вытяжки оптического волокна, наиболее перспективным является применение динамических частотно-импульсных систем автоматического управления объектами с запаздыванием. Это объясняется, прежде всего, возможностью получения высоких показателей качества управления в автоматической системе с частотно – импульсной модуляцией (ЧИМ) и сравнительно простой технической реализацией системы. Анализ методов исследования систем автоматического управления с динамической частотно – импульсной модуляцией показан в [44].

Частотно – импульсные управляющие алгоритмы имеют определенные преимущества по сравнению с управляющими алгоритмами, основанными на амплитудно, широтно-, и фазо – импульсной модуляции. Так, во многих случаях техническая реализация ЧИМ оказывается более простой по сравнению с другими импульсно – модулированными управляющими алгоритмами. Частотно – импульсные модулированные управляющие сигналы согласуются с большинством типов исполнительных механизмов, имеющих конечное число рабочих состояний, и имеют высокую степень помехозащищенности. В системах автоматического управления с частотно – импульсной модуляцией в закон управления входит фильтр со сбросом. Этот фильтр наряду с выполнением своей основной функций по улучшению динамических качеств системы приводит сглаживание случайных помех. Причем фильтр функционирует без накопления ошибок за счет обнуления достигнутых состояний через конечные интервалы времени [45].

При частотно-импульсной модуляции (ЧИМ) непрерывному процессу $x(t)$ ставится в соответствие последовательность импульсов $y^*(t)$ заданной формы, знак и интервал повторения T_n которых зависят от модулируемого процесса (рисунок 1.12). На практике чаще всего рассматриваются такие типы ЧИМ, которые генерируют импульсы прямоугольной формы.



а) модулируемый процесс, б) модулированная импульсная последовательность: где γ – длительность импульсов, а $T_n = t_{n+1} - t_n$ - интервал повторения: A - амплитуда

Рисунок 1.12 – Частотно – импульсная модуляция

Частотно-импульсный модулятор структурно можно представить в виде последовательного соединения динамического звена (фильтра Φ) и импульсного устройства ИУ, показанного на рисунке 1.13. В фильтре осуществляется некоторое динамическое преобразование непрерывного процесса $x(t)$ в сигнал $y(t)$. Импульсное устройство ИУ генерирует единичный δ - импульс в тот момент времени, когда выходной сигнал фильтра Φ достигает порогового значения и осуществляет обнуление всех накопителей энергии которые входят в состав фильтра (осуществляется операция сброса), что показано на рисунке 1.13 пунктирной линией параметрической обратной связи.

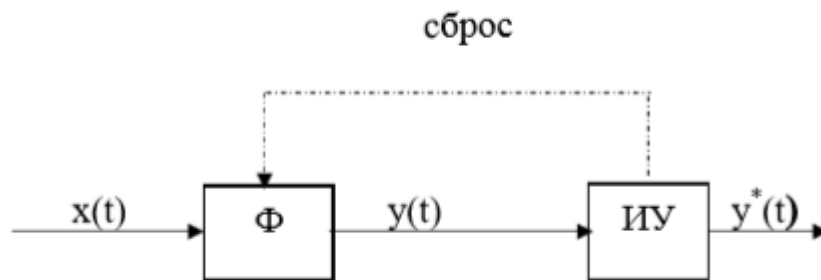


Рисунок 1.13 – Структурная схема ЧИМ

Если фильтр Φ выполнен в виде апериодического звена 1-го порядка, соответствующая модуляция называется Σ -частотно-импульсной модуляцией [46].

Частотно – импульсная система стабилизации является основным блоком соответствующей системы автоматического управления температурным режимом. В ней она одновременно выполняет функции управляющего устройства, где формируется закон управления. Для этого в ЧИСС имеются широкие возможности, так как в ее состав входит фильтр Φ , выбором структуры и параметров которого можно влиять на динамические свойства автоматических систем управления. Системы управления данного класса характеризуются наличием нелинейных преобразований сигналов, а также параметрическими обратными связями [47, 48].

Структурная схема Σ -ЧИСАУ объектами с запаздыванием приведена на рисунке 1.14 [49]. Для получения уравнения движения этой системы изучается каждый ее элемент в отдельности.

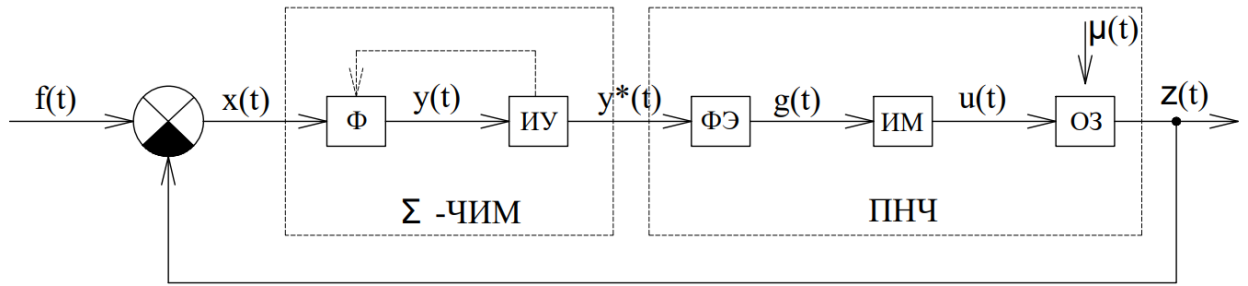


Рисунок 1.14 - Структурная схема Σ -ЧИСАУ

На входе системы действует стационарный случайный процесс $f(t)$. Приведенная непрерывная часть ПНЧ состоит из последовательного соединения управляемого объекта с запаздыванием, исполнительного механизма (ИМ) и формирующего элемента (ФЭ), задающего требуемую форму управляющих импульсов.

Непрерывная часть НЧ состоит из последовательного соединения управляемого объекта с запаздыванием, измерительного и исполнительного устройств. Объект с запаздыванием подвержен воздействию внешнего белого шума $\mu(t)$.

Введем следующие обозначения:

$$\mathbf{z}^v(t) = [z_1(t), z_2(t), \dots, z_l(t)]^T,$$

$$z_1(t) = z(t), z_2(t) = \dot{z}(t) \dots z_l(t) = z^{(l-1)}(t),$$

В общем случае НЧ характеризуется как нелинейная динамическая система со случайными параметрами и представляется некоторым дифференциальным уравнением следующего вида (в векторной форме) [50]:

$$\frac{d}{dt} \mathbf{z}^v(t) = \mathbf{H}[\lambda, \mathbf{z}^v(t), \mathbf{z}^v(t - \tau_0), g(\tau)], t = [0, T] \quad (1.5)$$

где $\mathbf{H}$ – непрерывный нелинейная вектор-функция, $\mathbf{z}^v(t)$ – вектор состояния, $\vec{q} = (1, 0, \dots, 0)$, $g(\tau)$ – последовательность управляющих случайных импульсов заданной формы; параметр λ характеризует случайность параметров вектор - функции $\mathbf{H}$; τ_0 - время запаздывания объекта управления

Так как в уравнении НЧ (1.5) запаздывание входит по всем векторам то начальные условия задаем для всех запаздывающих переменных следующим образом:

$$\mathbf{z}^v(t) = \mathbf{f}^v(t), t = [-\tau_0, 0]$$

Здесь $f^v(t)$ – заданная вектор функция. Однако если уравнение (1.5) имеет вид:

$$\frac{d}{dt} z^v(t) = H[\lambda, z^v(t), z(t - \tau_0), g(\tau)], t = [0, T]$$

тогда начальное условие для запаздывающей переменной описывается следующим образом:

$$z(t) = f(t), t = [0, \tau_0],$$

$f(t)$ - здесь функция определяющая разгон системы до начала запуска в целом. Если считать переменную z первой компоненте вектора $z^v(t)$, для корректности постановки задачи Коши, тогда $z_i^v(0) = C_i, i = \overline{2, l}$ - заданные постоянные, которые выбираются из промышленной задачи.

Уравнение движения сигма частотно-импульсного модулятора состоит из уравнения движения фильтра Φ и уравнений, определяющих моменты появления и знак импульсов, и операции сброса. В общем случае фильтр Φ характеризуется как нелинейная динамическая система с постоянными параметрами и его можно представить некоторым дифференциальным уравнением:

$$\dot{\vec{y}}(t) = \Phi[\vec{y}(t), x(t)], t = [0, T] \quad (1.6)$$

где Φ – непрерывная нелинейная вектор - функция с постоянными параметрами, $x(t)$ - входящий сигнал, $y(t)$ – выходящий сигнал, $\vec{y}(t)$, $\vec{d}$ - векторы.

Решение уравнения (1.6) можно записать, в общем случае, в следующем виде:

$$y(t) = W[x(\tau), \vec{y}(t_0) | t_0 \leq \tau \leq t], \quad (1.7)$$

где W – оператор преобразования вход-выход, осуществляемого в фильтре Φ ; $\vec{y}(t_0)$ - вектор начальных условий.

Когда выходной сигнал фильтра Φ $y(t)$ достигает порогового значения $\pm\Delta$ импульсного устройства ИУ, генерируется единичный δ - импульс и осуществляется обнуление всех начальных условий.

Допустим, что в некоторый момент времени $t = t_n$ импульсное устройство ИУ осуществило описанные выше операции. В этом случае для определения момента $t = t_{n+1}$ появления очередного импульса можно воспользоваться уравнением (1.7). Считая, что операция сброса осуществляется идеально, т.е.:

$$y(t_n + 0) = 0 \quad (1.8)$$

получим для момента t_{n+1} появления очередного $(n + 1)$ -го импульса следующее соотношение:

$$y(t_{n+1} - 0) = W[x(\tau), 0 | t_n + 0 \leq \tau \leq t_{n+1} - 0] = \lambda_{n+1} \Delta \quad (1.9)$$

где

$$\lambda_{n+1} = \text{sign } W[x(\tau), 0 | t_n + 0 \leq \tau \leq t_{n+1} - 0] = \text{sign } y(t_{n+1} - 0). \quad (1.10)$$

Уравнения (1.9) и (1.10), описывают поведение динамического ЧИМ, включенного в контур управления объектами с сосредоточенными параметрами.

Так как в уравнениях (1.9) и (1.10) не учтены свойства объектов с запаздыванием, рассмотрим получение уравнений модулятора, включенного в контур управления объектами с запаздыванием. Как известно [51-53], в объектах с запаздыванием влияние управляющего импульса проявляется на выходе с временной задержкой, не меньшей времени его запаздывания. Исходя из этого, при управлении такими объектами в течение времени, равного времени τ_0 запаздывания объекта, формировать следующий управляющий импульс нецелесообразно. В уравнениях, описывающих поведение Σ ЧИМ (1.9) и (1.10), не отражены вышеописанные особенности объектов с запаздыванием. Для учета вышеуказанной особенности объекта с запаздыванием следует видоизменить уравнения (1.9) и (1.10).

Допустим, что в некоторый момент $t = t_n$ на выходе ИУ появился n -й импульс. Тогда момент $t = t_{n+1}$ появления $(n + 1)$ -го импульса с учетом свойств объекта с запаздыванием будет определяться таким образом:

$$y(t_{n+1} - 0) = W[x(\tau), 0 | t_n + \tau_m \leq \tau \leq t_{n+1} - 0] = \lambda_{n+1} \Delta \quad (1.11)$$

где

$$\lambda_{n+1} = \text{sign } y(t_{n+1} - 0), \quad (1.12)$$

а τ_m - параметр динамического частотно-импульсного модулятора, учитывающий эффект запаздывания управляемого объекта ($\tau_m \geq \tau_0$) [54, 55].

Динамический частотно-импульсный модулятор, описываемый уравнениями (1.11) и (1.12), учитывающий особенности и свойства объекта с запаздыванием, в дальнейшем будем называть его динамическим ЧИМ для управления объектами с запаздыванием.

В случае, если фильтр Φ линейный, то оператор W тоже будет линейным; тогда его можно описать весовой или передаточной функцией и уравнения (1.9) и (1.10) примут вид

$$y(t_{n+1} - 0) = \int_{t_n+0}^{t_{n+1}-0} w(t_{n+1} - \tau) x(\tau) d\tau = \lambda_{n+1} \Delta,$$

где

$$\lambda_{n+1} = \text{sign } y(t_{n+1} - 0),$$

$$w(t) = \mathcal{L}^{-1}(W(p)),$$

где $\mathcal{L}^{-1}$ - обратное преобразование Лапласа, а W - передаточная функция фильтра Φ . Для Σ -ЧИМ весовая функция будет иметь вид:

$$w(t) = c_v e^{p_v t}.$$

Формирующий элемент ФЭ, входящий в состав приведенной непрерывной части, преобразует последовательность δ -импульсов Дирака $y^*(t)$ в последовательность импульсов $g(t)$ заданной формы. Фильтр ФЭ является линейным и его можно представить уравнением (где $g_\Phi(t)$ – подходящая весовая функция):

$$g(t) = \int_0^t g_\Phi(t - \tau) y^*(\tau) d\tau, t > \tau. \quad (1.13)$$

В частном случае, когда формируемые импульсы $g(t)$ имеют прямоугольную форму с амплитудой A и длительностью γ , передаточная функция формирующего элемента ФЭ имеет вид:

$$\mathcal{L}(g_\Phi(t)) = G_\Phi(p) = A \frac{(1 - e^{-\gamma \cdot p})}{p}, \quad (1.14)$$

где $\mathcal{L}$ - оператор преобразования Лапласа $\mathcal{L}(g(t)) = \int_0^{+\infty} e^{-pt} g(t) dt$.

Теперь рассмотрим уравнение системы в целом (рисунок 1.14). На входе системы действует стационарный случайный процесс $f(t)$. При составлении уравнения системы (рисунок 1.14) используются уравнения ее элементов (1.5), (1.6), (1.8), (1.11), (1.12) и уравнение замыкания. После подстановок уравнения системы примут вид [56]:

$$x(t) = f(t) - \vec{q}^T z^v(t), \quad (1.15)$$

$$\frac{d}{dt} z^v(t) = \mathbf{H}[\lambda, z^v, z^v(t - \tau_0), g(\tau)], t = [0, T], \quad (1.16)$$

$$z(t) = f(t), t = [-\tau_0, 0], z_i^v(0) = C_i, i = \overline{2, l}$$

$$g(t) = \int_0^t g_\Phi(t - \tau) y^*(\tau) d\tau, t > \tau, \quad (1.17)$$

$$y^*(t) = \sum_n \lambda_{n+1} \delta(t - t_{n+1}), \quad (1.18)$$

$$\lambda_{n+1} = \text{sign } y(t_{n+1} - 0), \quad n = 1, 2, \dots \quad (1.19)$$

$$y(t_{n+1} - 0) = \lambda_{n+1} \Delta, \quad (1.20)$$

$$y(t) = \vec{d}^T \vec{y}(t), \quad (1.21)$$

$$\dot{\vec{y}}(t) = \Phi[\vec{y}(t), x(t)], \quad t_n + 0 \leq t \leq t_{n+1} - 0, \quad (1.22)$$

где уравнение (1.16) – уравнение объекта управления, (1.22) – уравнение фильтра Σ -ЧИМ, (1.17) – уравнение формирования импульсов (уравнения ФЭ), (1.18)-(1.20) уравнения, описывающие моменты появления импульсов и их форму.

1.3 Постановка задачи исследования

Таким образом, проведенный анализ показал, что эксплуатационные характеристики оптического волокна, такие как распространение сигнала, его затухание, протяженность (дальность) передачи сигнала, успешное совместное применение с другими ОЭ (сращивание волокон), его высокая разрешающая способность, дисперсия в волокне, все это напрямую связано с процессом изготовления оптического волокна. Именно в процессе вытяжки оптического волокна закладываются его эксплуатационные характеристики. Волоконные детали с высокой разрешающей способностью можно получить только при использовании оптического волокна с одинаковой геометрией. Отклонения отдельных элементов геометрии (диаметра, формы поперечного сечения, размеров и т.п.) приводит к снижению частотно-контрастных характеристик детали, появлению микроструктурного шума и различного рода дефектов в рабочей зоне деталей. Также особенностью объекта управления является наличие запаздывания и его параметры подвержены существенным случайным помехам.

Приведенный выше анализ, современного состояния автоматического управления технологическим процессом вытяжки оптических волокон как объекта автоматического управления, показал ее недостаточную проработанность в разрезе особенностей промышленных действующих технологических процессов, ибо они являются объектами с запаздыванием и их параметры подвержены существенным случайным помехам и, как следствие этого, отсутствие эффективных методов исследования таких систем.

Поэтому целью данной работы является разработка математических моделей, и на этой основе, разработка системы автоматического управления технологическим процессом вытяжки оптического волокна в классе

динамических частотно-импульсных систем управления объектами с запаздыванием, что в свою очередь приведет к минимизации потерь готовой продукции, путем сокращения выпуска негодного волокна.

Из поставленной цели вытекают следующие задачи исследования:

1. Анализ технологического процесса вытяжки оптического волокна, как объекта управления;
2. Разработка математических моделей сигма частотно-импульсной системы автоматического управления температурным режимом процесса вытяжки оптического волокна в виде эквивалентной модели, мажорирующей модели, в виде стохастических дифференциальных уравнений Ланжевена и в форме дифференциальных уравнений Ито;
3. Экспериментальное исследование адекватности математических моделей и реальной Σ - ЧИСАУ температурным режимом процесса вытяжки оптического волокна;
4. Параметрический синтез сигма частотно – импульсной системы автоматического управления температурным режимом процесса вытяжки оптического волокна;
5. Исследование вопросов бесконтактного измерения диаметра и скорости протяжки оптического волокна в процессе изготовления.

1.4 Выводы по разделу

Основные результаты, полученные в первой главе:

1. Выполнен анализ основных этапов технологического процесса вытяжки оптического волокна, это этап приготовления преформы (заготовки) и этап вытяжки световода из разогретой стекломассы.
2. Технологический процесс вытяжки оптического волокна рассмотрен как объект автоматического управления.
3. Рассмотрены достоинства и недостатки систем автоматического управления применяемые в ТП вытяжки оптического волокна: ПИД – регулятор, Адаптивная система управления, робастно прогнозируемая система, Интеллектуальная автоматизированная система ситуационного управления (ИАССУ), а также, Системы управления по возмущению и отклонению.
4. Выявлено, что рассмотренный ТП, как объект управления, характеризуется многомерностью, стохастическим характером возмущающих воздействий, значительной инерционностью процессов и наличием запаздывания.
5. Обосновано, что наиболее перспективным является применение частотно-импульсных систем автоматического управления объектами с запаздыванием.
6. Выявлено, что до настоящего времени данный регулятор не применялся в ТП вытяжки оптического волокна и поэтому данное исследование является новым направлением и с научной, и с практической точки зрения.

7. Обосновано, что для разработки и исследования системы управления температурным режимом оптического волокна, необходимо разработать математические модели и оценить настроечные параметры регулятора.

8. Выявлена необходимость разработки устройства для бесконтактного измерения диаметра движущегося оптического волокна.

9. Выявлена необходимость разработки устройства для бесконтактного измерения скорости протяжки движущегося оптического волокна.

10. На основе проведенного анализа сформулированы цель и задачи данного диссертационного исследования.

11. Результаты исследований, представленных в первом разделе, опубликованы в [11, 13, 14, 37, 45, 54, 56].

2 РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ СИГМА ЧАСТОТНО – ИМПУЛЬСНОЙ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ ОБЪЕКТАМИ С ЗАПАЗДЫВАНИЕМ

Особенностью технологического процесса вытяжки оптического волокна является наличие запаздывания. Оно определяется временем прохождения вытягиваемого стеклоизделия от зоны формирования до датчика, определяющего размеры поперечного сечения. Наличие запаздывания в технологическом процессе приводит к тому, что сигнал на выходе объекта в течение некоторого времени после изменения входного сигнала остается неизменным. В связи с этим, важной задачей является – увеличение динамической точности регулирования. Низкая динамическая точность регулирования обусловлена инерционностью объекта регулирования.

В первой главе были проанализированы основные виды регуляторов, такие как ПИД регулятор, предиктор Смита, интеллектуальная автоматизированная система ситуационного управления, система виртуального мониторинга, представлены ссылки на работы, в которых показаны результаты, применения данных регуляторов в автоматизированных системах управления процессом вытяжки оптического волокна. По результатам исследования, путем сравнения и изучения принципов действия и влияния данных регуляторов на процесс автоматизации, с учетом преимуществ и недостатков влияния именно на процесс вытяжки оптического волокна, видно, что наиболее перспективным является применение динамических частотно-импульсных систем автоматического управления объектами с запаздыванием. Это объясняется, прежде всего, возможностью получения высоких показателей качества управления в автоматической системе с ЧИС и сравнительно простой технической реализацией системы [57].

Реальные условия функционирования башни вытяжки оптического волокна, а именно, состав заготовки, скорость подачи преформы, напряжение нагревательного элемента высокотемпературной печи, скорость вытяжки, характеризуются воздействием на них случайных возмущений. Поэтому, необходимы методы, ориентированные на исследование системы, работающей в стохастической среде. Исследование данной проблемы привело к разработке эквивалентной и мажорирующей систем управления.

Данная глава посвящена разработке математических моделей сигма частотно – импульсной системы управления температурным режимом вытяжки оптического волокна.

Исследование таких систем затруднительно из-за наличия логического условия сброса, из-за особенностей работы Σ -ЧИМ. В связи с этим, является перспективным направлением, где модулятор заменяется нелинейной системой, процессы которой, эквивалентны исходному модулятору.

Предложенная в работе процедура параметрического синтеза Σ ЧИСАУ температурным режимом высокотемпературной печи вытяжки оптического волокна состоит из следующих этапов [58]:

1. структурное преобразование Σ -ЧИМ, т.е. получение структурной модели - нелинейной эквивалентной исходному модулятору системы;
2. на основе структурной модели разработка математических моделей в классе стохастических дифференциальных уравнений Ланжевена и Ито;
3. оценка настроечных параметров Σ ЧИСАУ температурным режимом процесса вытяжки оптического волокна.

В разделе обращено особое внимание на адекватность построенных моделей исследуемой системы управления.

2.1 Структурная модель Σ -частотно-импульсной системы управления объектами с запаздыванием

Рассмотрим замкнутую систему автоматического управления с частотно- импульсной модуляцией (рисунок 1), содержащую непрерывную часть (1.5), описываемую дифференциальным уравнением со случайными коэффициентами, и модулятор, преобразующий непрерывный сигнал ошибки $x(t)$ в последовательность управляющих импульсов $y^*(t)$.

Стохастическая динамическая частотно-импульсная система управления объектами с запаздыванием (рисунок 2.1) состоит из импульсной и непрерывной частей.

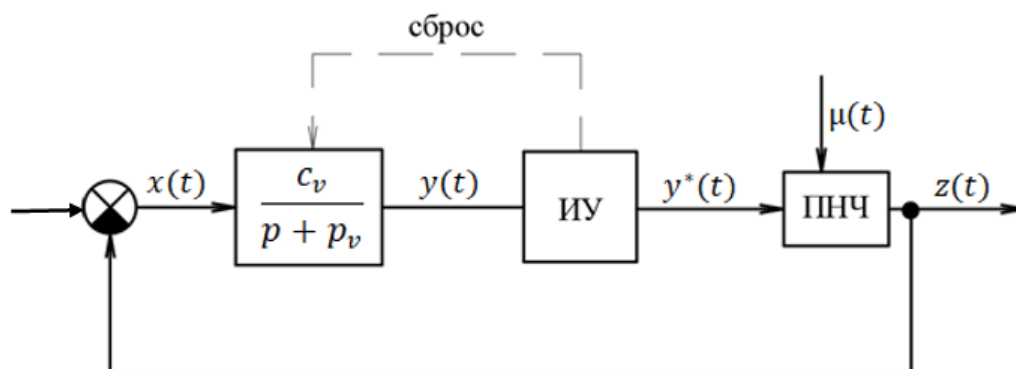


Рисунок 2.1 - Σ -частотно-импульсная система управления объектами с запаздыванием

Частотно-импульсный модулятор является основным блоком соответствующей системы автоматического управления. В данной системе он одновременно выполняет функции управляющего устройства, где формируется закон управления. Для этого в Σ -ЧИМ имеются широкие возможности, так как в его состав входит фильтр Φ , выбором структуры и параметров которого можно влиять на динамические свойства автоматических систем управления. Если фильтр Φ выполнен в виде апериодического звена 1-го порядка, соответствующая модуляция называется Σ -частотно-импульсной модуляцией и описывается следующей передаточной функцией [59]:

$$W(p) = \frac{c_v}{p + p_v} \quad (2.1)$$

где c_v - коэффициент усиления апериодического звена 1-порядка, а p_v - величина обратная постоянной времени, характеризующая инерционность звена, c_v, p_v – вещественные числа и $p_v > 0$ [60].

Действительно, поскольку весовая функция для Σ ЧИМ имеет вид $w(t) = c_v e^{-p_v t}$, то её передаточная функция

$$W(p) = \mathcal{L}(w(t)) = \int_0^{+\infty} e^{-pt} c_v e^{-p_v t} dt = c_v \left(-\frac{e^{-(p+p_v)t}}{p+p_v} \right) \Big|_0^{+\infty} = \frac{c_v}{p+p_v}.$$

Импульсной частью служит Σ - частотно-импульсный модулятор (Σ -ЧИМ), который задается уравнением фильтра Φ , реализованного в виде апериодического звена первого порядка и уравнениями, определяющими моменты появления импульсов и операции сброса.

В фильтре осуществляется некоторое динамическое преобразование непрерывного процесса $x(t)$ в сигнал $y(t)$. Импульсное устройство (ИУ) генерирует единичный δ - импульс в тот момент времени, когда выходной сигнал фильтра Φ достигает порогового значения и осуществляет обнуление всех «накопителей энергии» которые входят в состав фильтра (осуществляется операция сброса), что показано на рисунке 2.1, пунктирной линией параметрической обратной связи.

Уравнение движения Σ - частотно-импульсного модулятора состоит из уравнения движения апериодического звена и уравнений, определяющих моменты появления и знак импульсов, и операции сброса. Так как, наш объект управления, зона перетяжки оптического волокна, обладает запаздыванием, необходимо получить уравнение модулятора, включенного в контур управления объектами с запаздыванием. Как известно, в объектах с запаздыванием влияние управляющего импульса проявляется на выходе с временной задержкой, не меньшей времени его запаздывания. Исходя из этого, при управлении такими объектами в течение времени, равного времени запаздывания объекта τ_o , формировать следующий управляющий импульс нецелесообразно.

Допустим, что в некоторый момент $t = t_n$ на выходе ИУ появился n – й импульс. Моменты появления импульсов вида $y^*(t) = \sum \lambda_{n+1} \delta(t - t_{n+1})$ и операции сброса с учетом свойств объекта с запаздыванием определяются соответственно уравнениями:

$$y(t_{n+1} - 0) = \int_{t_n + \tau_m}^{t_{n+1}} c_v e^{-p_v(t_{n+1} - \tau)} x(\tau) d\tau = \lambda_{n+1} \Delta \quad (2.2)$$

$$\text{где} \quad \lambda_{n+1} = \text{sign } y(t_{n+1} - 0) \quad (2.3)$$

$$y^*(t) = \sum \lambda_{n+1} \delta(t - t_{n+1}) \quad (2.4)$$

τ_m – параметр Σ частотно–импульсного модулятора, учитывающий эффект запаздывания управляемого объекта ($\tau_m > \tau_o$) [59, с.435].

Динамика приведенной непрерывной части ПНЧ (в линейном случае) описывается системой уравнений, записанной в векторном виде:

$$\frac{d}{dt} \mathbf{z}^v(t) = Q_\lambda \overline{\mathbf{z}^v}(t) + \vec{b}g(t), t = [0, T]$$

$$z(t) = f(t), t = [-\tau_0, 0], \mathbf{z}_i^v(0) = C_i, i = \overline{2, l}$$

где Q_λ матрица ($l \times l$), $\vec{b} = (0, \dots, 0, 1)_l$ вектор. Можно перейти от системы к одному уравнению более высокого порядка:

$$\begin{aligned} z^{(l)}(t) + [a_{0l} + \mu_1(t)] z^{(l-1)}(t) + [a_{0l(l-1)} + \mu_2(t)] z^{(l-2)}(t) + \\ + [a_{0l(l-2)} + \mu_3(t)] z^{(l-3)}(t) + \dots + [a_{0l1} + \mu_l(t)] z(t) = g(t). \end{aligned} \quad (2.5)$$

где $\{a_{0li}\}_{i=1}^l$ – постоянные коэффициенты, $\mu_1(t), \dots, \mu_l(t)$ – коррелированные гауссовские белые шумы, причем их математические ожидания и ковариационная матрица удовлетворяют условиям:

$$M\{\mu_i(t)\} = 0, \quad M\{\mu_i(s), \mu_j(t)\} = r_{ij} \delta(t - s), \quad i, j = 1, 2, \dots, l, \quad (2.6)$$

где r_{ij} – интенсивность белого шума, а $\delta(t - s)$ – функция Дирака, $M\{\mu_i(s), \mu_j(t)\} = M\left[\left(\mu_i(s) - M(\mu_i(s))\right)\left(\mu_j(t) - M(\mu_j(t))\right)\right]$ – ковариационная матрица случайных величин $\mu_i(s)$ и $\mu_j(t)$.

2.2 Построение эквивалентной стохастической модели сигма частотно - импульсной системы с запаздыванием

Математическая модель сигма частотно – импульсных систем автоматического управления с объектами с запаздыванием (1.15) - (1.20) является неоднородной с точки зрения используемых в ней типов уравнений, потому что, кроме интегральных соотношений присутствует логическое условие сброса. Поэтому, трудно ожидать, что методы анализа такой модели окажутся конструктивными. В связи с этим, необходимо вначале преобразовать математическую модель, чтобы она стала однородной. Необходимо произвести замену модулятора нелинейной эквивалентной системой.

Процедура построения нелинейной системы, эквивалентной Σ ЧИМ, не содержащей параметрических обратных связей, подробно представлена в работах [61,62], а особенности Σ -частотно-импульсного модулятора ДЧИМ, который задается уравнением фильтра Φ и уравнениями, определяющими моменты появления импульсов и операции сброса описаны в работе [63].

Структурную схему системы, эквивалентной по отношению к исходной системе (рисунок 2.1), можно представить в виде рисунка 2.2.

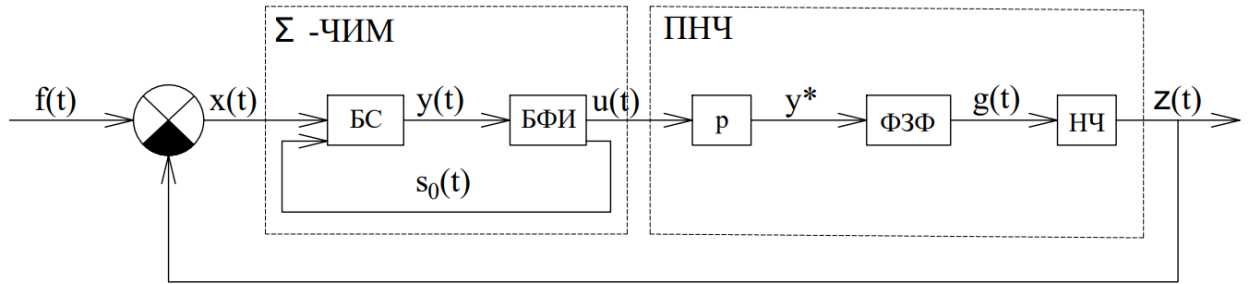


Рисунок 2.2 – Эквивалентная стохастическая система

Как видно из рисунка 2.2, в эквивалентной системе модулятор заменен тремя блоками: блоком сброса - БС, блоком формирования импульсов - БФИ и дифференцирующим звеном с передаточной функцией $W(p) = p$.

Процессы, протекающие в блоке сброса БС тождественны с процессами, протекающим в фильтре Φ модулятора. Здесь осуществляется преобразование процесса ошибки $x(t)$ в непрерывный процесс $y(t)$ на отрезке $t_n + 0 \leq t \leq t_{n+1} - 0$. Выход $y(t)$ претерпевает разрывы первого рода в моменты $t = t_n + 0$, т.е. выполняется:

$$y(t_{n+1} - 0) = y(t_n + 0) + c_v \left[\int_{t_n+0}^{t_n+\tau_m} x(\tau) d\tau + \int_{t_n+\tau_m}^{t_{n+1}} x(\tau) d\tau \right] \quad (2.7)$$

Выполнение условия (2.2) осуществляется за счет принудительного удержания выхода $y(t)$ в нулевом состоянии в течение времени запаздывания объекта после выдачи управляющего импульса (2.4). В отличие от блока сброса обычного ДЧИМ [64], в структуре блока сброса системы с запаздыванием присутствует дополнительный блок формирования сигнала $\mu(t)$ [65].

Назначение этого дополнительного блока заключается в формировании сигнала, принудительно удерживающего выход апериодического звена модулятора $y(t)$ в нулевом положении после выдачи импульса управления в течение времени запаздывания объекта.

В блоке формирования импульсов БФИ осуществляется операция сравнения процесса $y(t)$ с порогом $\pm\Delta$ и, при выполнении условия (2.9), формируется два импульса: первый, $y^*(t) = \sum_n \lambda_{n+1} \delta(t - t_{n+1})$ (2.4) - служит

выходом ДЧИМ; второй $s_0(t) = \delta(t - t_{n+1})$ служит сигналом сброса и поступает обратно в БС.

Структурная схема блока формирования импульсов БФИ после ряда преобразований [66] приведена на рисунке 2.3а., на рисунке 2.3б представлена характеристика релейного элемента с однозначной нелинейностью.

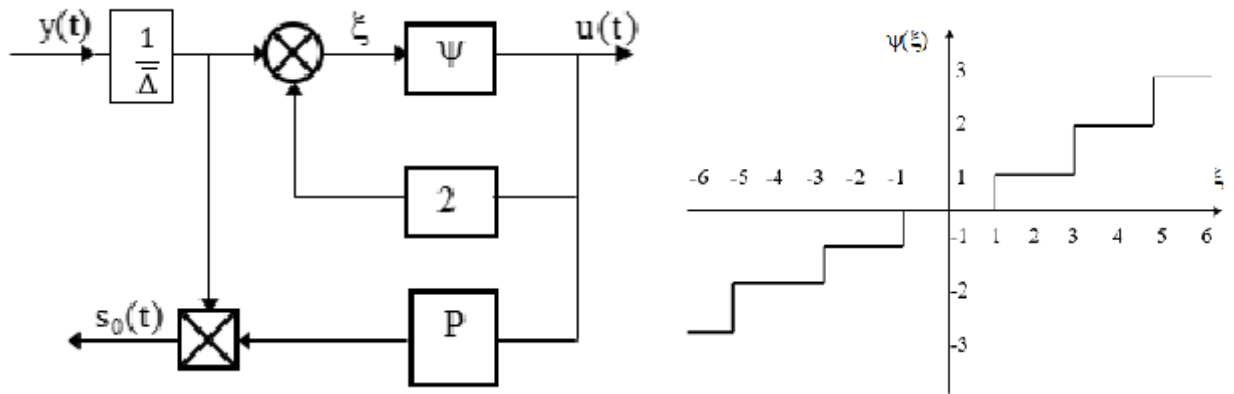


Рисунок 2.3 - Структурная схема блока формирования импульсов

$$\psi(\xi) = \begin{cases} n, & 2n - 1 \leq \xi \leq 2n + 1, & n = 1, 2, \dots \\ 0, & -1 \leq \xi \leq 1 \\ -n, & -2n - 1 \leq \xi \leq -2n + 1, & n = -1, -2, \dots \end{cases} \quad (2.8)$$

Структурная схема БФИ является инвариантной к конкретному виду модулятора. В то же время, структурная схема блока сброса БС зависит от свойств фильтра Φ в модуляторе.

Блок сброса для фильтра типа апериодического звена. В качестве управляющего устройства для автоматического управления температурным режимом вытяжки оптического волокна, как объекта, обладающего запаздыванием, используется Σ -ЧИМ. В этом случае фильтр Φ модулятора характеризуется передаточной функцией вида (2.1) и выход со входом фильтра связаны уравнениями [67]:

$$y(t_{n+1} - 0) = \int_{t_n + \tau_m}^{t_{n+1}} w(t_{n+1} - \tau) x(\tau) d\tau = \lambda_{n+1} \Delta \quad (2.9)$$

где импульсная (весовая) характеристика Σ -ЧИМ:

$$w(t) = c_v e^{-p_v t} \quad (2.10)$$

Моменты появления t_{n+1} импульса управления для модифицированного Σ -ЧИМ объектами с запаздыванием определяются из уравнения:

$$y(t_{n+1} - 0) = c_v \int_{t_n + \tau_m}^{t_{n+1}} e^{-p_v(t_{n+1} - \tau)} x(\tau) d\tau = \lambda_{n+1} \Delta \quad (2.11)$$

где

$$\lambda_{n+1} = \text{sign } y(t_{n+1} - 0). \quad (2.12)$$

Рассмотрим произвольный момент времени t_n . Пусть выходной сигнал в этот момент времени равен $y(t_n + 0)$.

Тогда для моментов времени $t \geq t_n$:

$$\tilde{y}(t) = e^{-p_v(t-t_n)} y(t_n + 0) + c_v \int_{t_n + 0}^t e^{-p_v(t-\tau)} x(\tau) d\tau, \quad (2.13)$$

где $\tilde{y}(t)$ - выходной сигнал фильтра при начальном условии $y(t_n + 0)$ (отличном от нуля), в момент времени t . То есть значение выходного сигнала растёт со временем.

Подставим $t = t_{n+1} - 0$ в уравнение (2.13) перепишем в следующем виде:

$$\begin{aligned} \tilde{y}(t_{n+1} - 0) = & e^{-p_v(t_{n+1}-t_n)} y(t_n + 0) + \\ & + c_v \left[\int_{t_n + 0}^{t_n + \tau_m} e^{-p_v(t_{n+1}-\tau)} x(\tau) d\tau + \int_{t_n + \tau_m}^{t_{n+1}} e^{-p_v(t_{n+1}-\tau)} x(\tau) d\tau \right]. \end{aligned} \quad (2.14)$$

Из сравнения (2.14) с левой частью (2.11) следует, что для того, чтобы в момент времени $t = t_{n+1} - 0$ выходной сигнал фильтра $\tilde{y}(t_{n+1} - 0)$ был равен $y(t_{n+1} - 0)$ (то есть удовлетворял условию Σ - ЧИМ) нужно «убрать» слагаемые $e^{-p_v(t-t_n)} y(t_n + 0)$ и $\int_{t_n + 0}^{t_n + \tau_m} e^{-p_v(t_{n+1}-\tau)} x(\tau) d\tau$.

Этого можно достичь путём формирования и подачи на вход фильтра Φ в момент времени $t = t_n + 0$ сигналов $\mu(t)$ и $\eta(t)$, после чего выход примет вид:

$$\begin{aligned} \tilde{y}(t) = & e^{-p_v(t-t_n)} y(t_n + 0) + c_v \int_{t_n + 0}^{t_n + \tau_m} e^{-p_v(t-\tau)} [x(\tau) - \\ & \mu(\tau)] d\tau + c_v \int_{t_n + \tau_m}^{t_{n+1}} e^{-p_v(t-\tau)} x(\tau) d\tau - c_v \int_{t_n + 0}^{t_{n+1}} e^{-p_v(t-\tau)} \eta(\tau) d\tau, \end{aligned} \quad (2.15)$$

где $\mu(t), \eta(t)$ - сигналы сброса. Форма сигналов может быть получена так: для формирования сигнала $\mu(t)$ представим его в виде произведения двух сигналов [68]:

$$\mu(t) = x(t)\chi(t) \quad (2.16)$$

$$\chi(t) = \int_{t_n}^t q_{\tau_m}(t - \tau)\delta(\tau - t_n)d\tau \quad (2.17)$$

где

$$q_{\tau_m}(t) = \mathcal{L}^{-1} \left[\frac{1 - \exp(-\tau_m p)}{p} \right] = 1 - \theta(t - \tau_m)$$

импульсная переходная функция формирующего звена первого порядка.

Сигнал $\eta(t)$ формируется по выражению:

$$\eta(t) = \delta(t - t_n) \frac{y(t_n + 0)}{c_v} \quad (2.18)$$

Структурная схема блока сброса Σ -ЧИМ, который используется в нашем случае, для управления температурным режимом вытяжки оптического волокна при наличии запаздывания, приведена на рисунке 2.4.

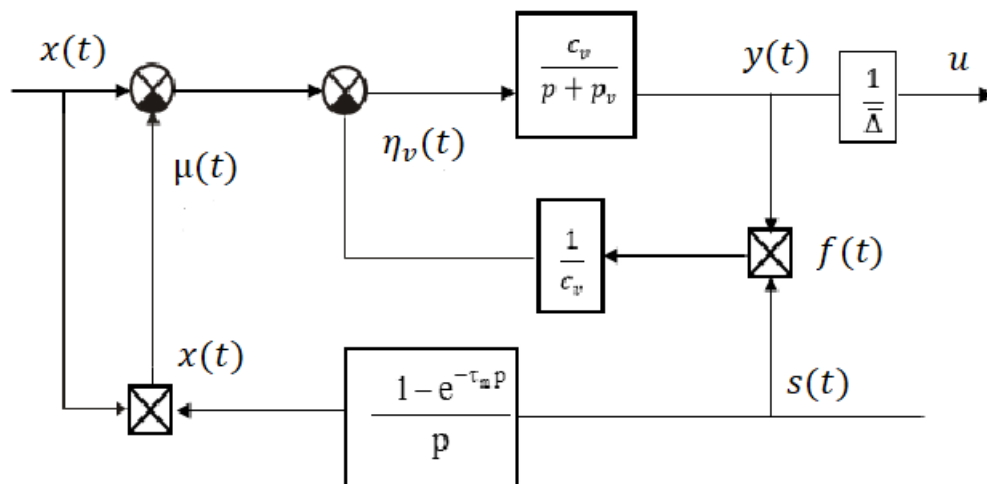


Рисунок 2.4 - Блок сброса Σ -ЧИСАУ

Эквивалентная система (рисунок 2.2) позволяет получить однородную математическую модель сигма частотно – импульсной системы автоматического управления температурным режимом технологического

процесса вытяжки оптического волокна, как объекта с запаздыванием. В то же время следует отметить, что она является достаточно сложной. Поэтому, для решения нашей практической задачи достаточно использовать более простую систему. Ниже приведена процедура мажорирующей системы, характеризуемой более простой структурой. Эти системы отличаются от исходных тем, что в них показатели состояния, вызванные внутренними нелинейными преобразованиями случайных процессов, оцениваются внешними аддитивными и мультипликативными случайными шумами.

Под мажорирующей системой понимается система, в которой процессы на выходе блока сброса БС $y_m(t)$ и выходе приведенной непрерывной части ПНЧ $z_m(t)$ мажорируют соответствующие процессы эквивалентной системы (рисунок 2.2) в смысле некоторых статистических характеристик [69,70]. Например:

$$\max_{t_0, y_0} M |y(t, t_0, y_0)|^p \leq \max_{t_0, y_0} M |y_m(t, t_0, y_0)|^p \quad (2.19)$$

$$\max_{t_0, y_0} M |z(t, t_0, z_0)|^p \leq \max_{t_0, y_0} M |z_m(t, t_0, z_0)|^p \quad (2.20)$$

В полученной системе отсутствуют нелинейные обратные связи операции сброса. Они заменяются внешними случайными возмущениями, найденными из условия мажорирования.

Для построения мажорирующей системы рассмотрим сигнал $s_0(t)$ обратной связи операции сброса эквивалентной системы (рисунок 2.2). Он представляет собой последовательность независимых импульсов со случайными временными положениями:

$$s_0(t) = \sum_{n=1}^N \delta(t - t_n), \quad 0 \leq t \leq T \quad (2.21)$$

Независимость $\delta(t - t_i)$ и $\delta(t - t_j), i \neq j$ вытекает из наличия операции сброса. Обозначим среднюю продолжительность между импульсами в сигнале $s_0(t)$ через τ_0 . Далее вместо сигнала $s_0(t)$ рассмотрим сигнал $s_*(t)$, состоящий из непересекающихся импульсов одинаковой формы с длительностью θ и амплитудой $\frac{1}{\theta}$ (при $\theta \rightarrow 0$ получим δ -импульсы). Средняя продолжительность τ_* между импульсами в сигнале $s_*(t)$ удовлетворяет неравенству:

$$\tau_* < \tau_0 \quad (2.22)$$

т.е. шум $s_*(t)$ является более густым, чем сигнал $s_0(t)$. Шум $s_*(t)$ характеризуется малым, но конечным временем корреляции τ_k , а спектр его

достаточно широкий. Такой шум, если выполняется неравенство $\tau_k \ll \tau_c$, где τ_c - наименьшая постоянная времени элементарных фильтров в блоке сброса БС, т.е.:

$$\tau_c = \min_{i=1,m} \left\{ \tau_i = \frac{1}{p_i} \right\} \quad (2.23)$$

можно заменить эквивалентным белым шумом $s(t)$ с интенсивностью σ_0^2 (интенсивность измеряется в Вт·с).

На рисунке 2.5 приведена структурная схема мажорирующей стохастической частотно-импульсной системы.

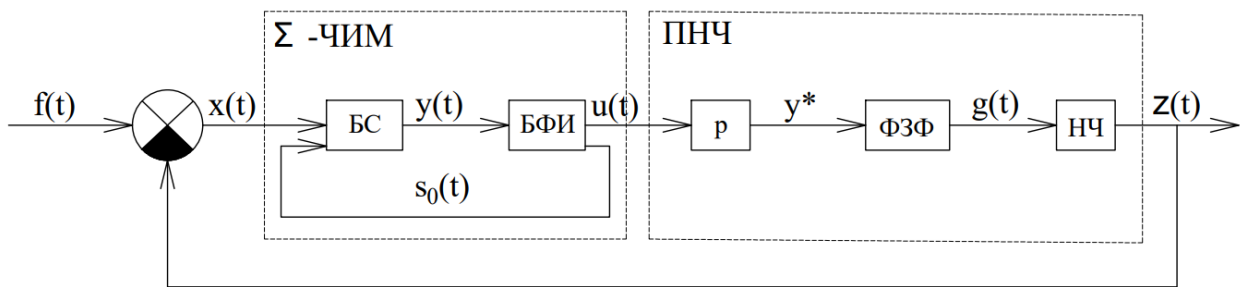


Рисунок 2.6 - Структурная схема мажорирующей стохастической частотно-импульсной системы

В дальнейшем задача построения мажорирующей системы сводится к оценке интенсивности σ_0^2 из условия мажорирования. Она зависит от значений параметров фильтра в Σ ЧИМ и модулируемого сигнала $x(t)$.

Корреляционную функцию шума вида $s_*(t)$ можно представить в виде [71]:

$$R_*(\tau) = \frac{1}{\tau_*^2} k(\tau) \quad (2.24)$$

где $k(\tau)$ - нормированная узкая функция. Тогда, интенсивность заменяющего белого шума $s(t)$ определяется соотношением [72]:

$$\sigma_0^2 = \int_{-\infty}^{\infty} \frac{1}{\tau_*^2} k(\tau) d\tau = 2 \frac{\tau_k}{\tau_*^2} \quad (2.25)$$

Можно заметить, что между временем корреляции τ_* шума $s_*(t)$ и возможно минимальным периодом T_0 появления импульсов в Σ ЧИМ имеет место неравенство:

$$0 \leq \tau_k \leq T_0 = \min_{n=1,2,3,\dots,N} \{t_n\}. \quad (2.26)$$

В противном случае импульсы в последовательности $s_*(t)$ будут зависимыми (т.е. не выполняется условие сброса). Тогда, имеет место:

$$\sigma_0^2 \leq 2 \frac{1}{\tau_*^2} T_0. \quad (2.27)$$

Среднюю продолжительность τ_* между импульсами в последовательности $s_*(t)$ можно оценить. Такая оценка вытекает из неравенства (2.26). Отсюда видно, что в последовательности $s_*(t)$ имеются импульсы с меньшими интервалами появления, чем T_0 , и большими. Тогда, для простоты можно считать среднюю продолжительность между импульсами равной:

$$\tau_* \cong T_0 \quad (2.28)$$

С учётом (2.28) неравенство (2.27) примет вид:

$$\sigma_0^2 \leq \frac{2}{T_0}, \quad (2.29)$$

где T_0 - минимальный период появления импульсов в Σ - ЧИМ.

Таким образом, установили, что интенсивность σ_0^2 мажорирующего белого шума $s(t)$ удовлетворяет неравенству (2.29). Чем реже появляются импульсы, тем интенсивность заменяющего шума меньше, и наоборот. При этом не нарушается условие мажорирования (2.19) и (2.20), т.е. возможные отклонения процессов $y_m(t)$ и $z_m(t)$ мажорирующей системы будут не меньшими, чем процессов $y(t)$ и $z(t)$ эквивалентной системы (рисунок 2.6).

На основе модуляционной характеристики (2.11) получим соотношения для минимального периода $T_0 = \min_n(t_{n+1} - t_n)$:

$$\max_{t_n} \left| c_v \int_{t_n+0}^{t_{n+1}-0} e^{-p_v(t-\tau)} x(\tau) d\tau \right| = \Delta.$$

$$c_v \max_t |x(t)| \cdot \max_{t_n} \int_{t_n+0}^{t_{n+1}-0} e^{-p_v(t-\tau)} d\tau \geq \Delta,$$

$$c_v \max_t |x(t)| \cdot \max_{t_n} \frac{1 - e^{p_v(t_n - t_{n+1})}}{p_v} \geq \Delta,$$

$$\max_{t_n} 1 - e^{p_v(t_n - t_{n+1})} \geq \frac{\Delta p_v}{c_v \max_t |x(t)|},$$

$$T_0 = \max_{t_n} (t_{n+1} - t_n) \geq \ln \left(1 - \frac{\Delta p_v}{c_v \max_t |x(t)|} \right)^{-\frac{1}{p_v}},$$

И из (2.29) получим:

$$\sigma_0^2 \leq \frac{2}{\ln \left(1 - \frac{\Delta p_v}{c_v \max_t |x(t)|} \right)^{-\frac{1}{p_v}}}$$

Полученные эквивалентные системы (рисунок 2.2 и рисунок 2.6) служат основой для построения математических моделей Σ -частотно-импульсной системы автоматического управления температурным режимом вытяжки оптического волокна в виде статистических дифференциальных уравнений Ланжевена и форме стохастических дифференциальных уравнений Ито, используемые в дальнейшем для исследования свойств данного класса систем.

2.3 Построение математической модели сигма частотно – импульсной системы автоматического управления объектами с запаздыванием в виде стохастических дифференциальных уравнений Ланжевена

В условиях наличия в рассматриваемой системе автоматического управления температурным режимом вытяжки оптического волокна случайных возмущений, целесообразно, дальнейшее исследование ее устойчивости и качества проводить в классе стохастических частотно-импульсных систем автоматического управления объектами. Для этого должны быть получены модели в виде стохастических дифференциальных уравнений, описывающих эквивалентные и мажорирующие системы [73,74]. В зависимости от статистических характеристик возмущений, могут быть получены стохастические дифференциальные уравнения в виде Ланжевена, с последующим их преобразованием к форме Ито [75]. Нахождение решения дифференциального уравнения, описывающего процесс управления

температурным режимом вытяжки оптического волокна, дают возможность дальнейшего моделирования этого процесса и управления им.

Приведенную непрерывную часть ПНЧ системы, описываемой уравнением (2.5) можно представить в следующем виде [76,77]:

$$\frac{d}{dt} \mathbf{z}^v(t) = A_0 \mathbf{z}^v(t) + D_0 [\mathbf{z}^v] \vec{\mu}(t) + b_0 u(t), t = [0, T] \quad (2.30)$$

$$z(t) = f(t), t = [-\tau_0, 0], \mathbf{z}_i^v(0) = C_i, i = \overline{2, l}$$

где

$$A_0 = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 1 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ -a_{0l1} & -a_{0l2} & \dots & \dots & -a_{0ll} \end{bmatrix}, \quad D_0 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ -z_1 & -z_2 & \dots & \dots & -z_l \end{bmatrix},$$

$$b_0 = [0 \ 0 \ \dots \ 1]^T$$

$$\mathbf{z}^v(t) = [z_1(t), z_2(t), \dots, z_l(t)]^T,$$

$$z_1(t) = z(t), z_2(t) = \dot{z}(t) \dots z_l(t) = z^{(l-1)}(t),$$

$$\vec{\mu}(t) = [\mu_1(t), \mu_2(t), \dots, \mu_l(t)]^T,$$

$$\vec{q}_0 = [1, 0, \dots, 0]_l^T,$$

где, A_0 , D_0 и b_0 – соответственно вещественные постоянные матрицы размерности $l \times l, l \times l, l \times 1$.

Уравнения (2.2) - (2.4), описывающие поведение Σ -частотно-импульсного модулятора являются неоднородными, так как кроме интегральных соотношений присутствует логическое условие сброса. В этой связи, наиболее перспективным направлением является замена модулятора нелинейной эквивалентной системой, не содержащей параметрических обратных связей.

В работах [78,79] путем структурных преобразований получена структурная модель сигма частотно-импульсной системы автоматического управления объектами с запаздыванием (рисунок 2.7).

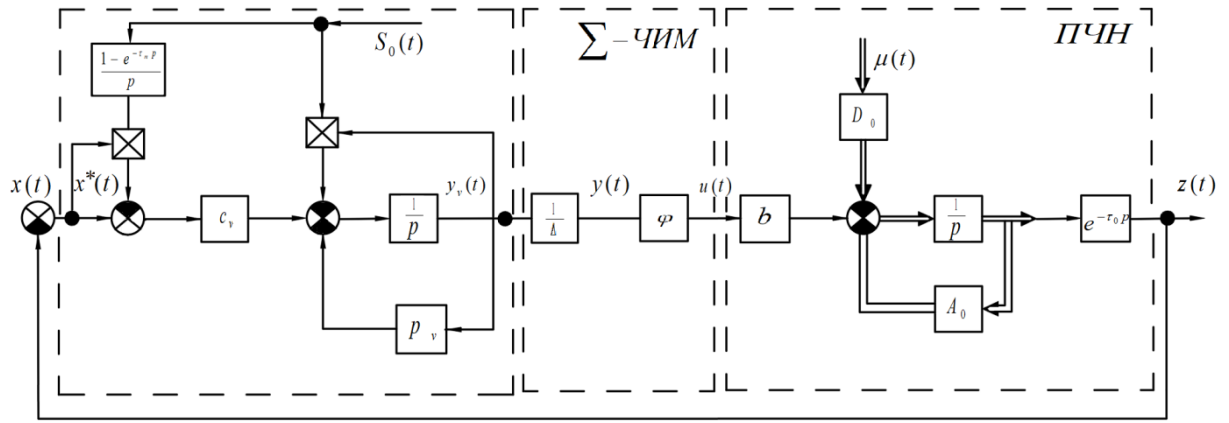


Рисунок 2.7 - Σ -ЧИСАУ для управления объектами с запаздыванием

Дифференциальные уравнения мажорирующей системы в форме Ланжевена. Поведение блока БС структурной модели Σ – ЧИСАУ описывается уравнением (рисунок 2.7):

$$\dot{y}_v(t) = p_v y_v(t) - y_v(t) s(t) - c_v x^*(t), \quad y(t) = \frac{1}{\Delta} y_v(t) \quad (2.31)$$

Сигнал $x^*(t)$ на рисунке 2.7, формируется в виде:

$$x^*(t) = -x(t) + \int_0^{\infty} q_{\tau_m}(t - \tau) \dot{x}(t) d\tau = -x(t - \tau_m) \quad (2.32)$$

где $q_{\tau_m}(t) = L^{-1} \left[\frac{1 - \exp(-\tau_m p)}{p} \right]$ - импульсная переходная функция формирующего звена первого порядка.

С учетом (2.32), уравнение БС модулятора примет вид:

$$\dot{y}_v(t) = p_v y_v(t) - y_v(t) s(t) + c_v x(t - \tau_m) \quad (2.33)$$

Объединяя уравнение ПНЧ (2.30) и уравнение БС модулятора (2.33), получим стохастические дифференциальные уравнения системы в форме Ланжевена:

$$x(t) = f(t) - z(t),$$

$$\frac{d}{dt} \mathbf{z}^v(t) = A_0 \mathbf{z}^v(t) + D_0 [\mathbf{z}^v] \vec{\mu}(t) + b_0 u(t), \quad t = [0, T] \quad (2.34)$$

$$z(t) = f(t), \quad t = [-\tau_0, 0], \quad \mathbf{z}_i^v(0) = C_i, \quad i = \overline{2, l}$$

$$u(t) = \psi(y(t)), \quad y(t) = \frac{1}{\Delta} y_v(t) \quad (2.35)$$

$$\dot{y}_v(t) = p_v y_v(t) - N_0[y_v]s(t) + c_v x(t - \tau_m), \quad N_0[y_v] = -y_v(t) \quad (2.36)$$

где

$$\vec{\mu}(t) = [\mu_1(t), \dots, \mu_l(t)]^T, \quad D_0[z^v] = \begin{bmatrix} 0 & \dots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ -z_1 & \dots & -z_l \end{bmatrix},$$

$$\vec{q}_1^T = \vec{q}_0^T e^{-A_0 \tau_0},$$

где ψ - нелинейная функция, описывающая блок БФИ, $\vec{\mu}(t)$ и $s(t)$ - случайные процессы (гауссовские белые шумы) с нулевым математическим ожиданием и автокорреляционной функцией $M(\mu_i(t)\mu_j(s)) = r_{ij}\delta(t-s)$, где $\{r_{ij}\}$ - корреляционная матрица, а $M(s(t)s(\tau)) = \delta(t-\tau)$.

Полученные стохастические дифференциальные уравнения (2.34) - (2.36) дают возможность для построения модели системы в форме Ито.

2.4 Построение математической модели сигма частотно – импульсной системы автоматического управления объектами с запаздыванием в виде стохастических дифференциальных уравнений Ито

Воспользуемся процедурой преобразования стохастических дифференциальных уравнений в форме Ланжевена к стохастическим дифференциальным уравнениям в форме Ито [80]. Она состоит из двух шагов. На первом шаге заменяются зависимые шумы $\mu_1(t), \dots, \mu_l(t)$ независимыми шумами $\dot{w}_1(t), \dots, \dot{w}_l(t)$, где $w_1(t), \dots, w_l(t)$ - независимые стандартные винеровские процессы. Это создаёт дополнительные трудности, поскольку винеровский процесс не имеет конечной дисперсии, и потребуется объяснить, в каком смысле понимаются эти производные. Сначала составим соотношение [75, с.143]:

$$\mu_i(t) = \sum_{k=1}^l \delta_{ik} \dot{w}_k(t) \quad (2.37)$$

где интенсивности δ_{ik} независимых шумов определяются из матричного уравнения

$$[\delta_{ij}][\delta_{ji}] = [r_{ij}] \quad (2.38)$$

Элементы r_{ij} матрицы $[r_{ij}] = \vec{R}$ определены интенсивностями белых шумов (2.6). В аналогичных обозначениях шум $s(t)$ представляется в виде:

$$s(t) = \sigma_0 \dot{\eta}(t), \quad (2.39)$$

где σ_0^2 - интенсивность шума $s(t)$, удовлетворяющая неравенству (2.29).

Подставляя представления белых шумов (2.37) - (2.39), перепишем уравнения стохастических дифференциальных уравнений мажорирующей системы в форме Ланжевена (2.34) - (2.36) таким образом:

$$\frac{d}{dt} \mathbf{z}^v(t) = A_0 \mathbf{z}^v(t) + D_0[\mathbf{z}^v] \vec{\mu}(t) + b_0 u(t), t = [0, T] \quad (2.41)$$

$$(t) = f(t), t = [-\tau_0, 0], \mathbf{z}_i^v(0) = C_i, i = \overline{2, l}$$

$$u(t) = \psi(y(t)), y(t) = \frac{1}{\Delta} y_v(t) \quad (2.42)$$

$$\dot{y}_v(t) = p_v y_v(t) + c_v x(t - \tau_m) - N_1[y_v] \dot{\eta}(t) \quad (2.43)$$

где

$$D_1[\mathbf{z}^v] = \sum_{k=1}^l D_k z_k, \quad D_k = \begin{bmatrix} 0 & \cdots & 0 \\ \cdots & \ddots & \cdots \\ -\delta_{k1} & \cdots & -\delta_{kl} \end{bmatrix} \quad (2.44)$$

$$N_1[y_v] = -\sigma_0^2 y_v(t). \quad (2.45)$$

На втором шаге корректируются значения вектора сноса уравнений (2.41) – (2.43). Согласно формулам, приведенным в [80, с.197], для уравнений (2.41) – (2.43) коррекции сноса определяются, соответственно, в виде:

$$\frac{1}{2} D_{1z}[\mathbf{z}^v] D_1[\mathbf{z}^v] dt, \quad (2.46)$$

$$\frac{1}{2} N_{1y}[y] N_1[y] dt, \quad (2.47)$$

Где

$$D_{1z}[\mathbf{z}^v] = \frac{d}{dz} D_1[\mathbf{z}^v], \quad N_{1y}[y] = \frac{d}{dy} N_1[y]$$

Подставляя (2.46) - (2.47) в уравнения (2.41) - (2.43), после преобразований получим:

$$d\mathbf{z}^v(t) = [A_0\mathbf{z}^v(t) + \vec{b}_0 u(t)]dt + \frac{1}{2}D_{1z}[\mathbf{z}^v]D_1[\mathbf{z}^v]dt + D_1[\mathbf{z}^v]dw(t),$$

$$t = [0, T]$$

$$x(t) = \vec{q}_0^T \mathbf{z}^v(t - \tau_o), \quad u(t) = \psi(y(t)), \quad y(t) = \frac{1}{\Delta} y_v(t) \quad (2.48)$$

$$dy_v(t) = [p_v y_v(t) + c_v x(t - \tau_m)]dt + \frac{1}{2}N_{1y}[y_v]N_1[y_v]dt + N_1[y_v]d\eta(t).$$

Ввиду выполнения условия $\tau_o > \tau_m$ никаких проблем с запаздыванием по переменной y_v не возникнет.

Введем обозначения:

$$A\mathbf{z}^v(t) = A_0\mathbf{z}^v(t) + \frac{1}{2}D_{1z}[\mathbf{z}^v]D_1[\mathbf{z}^v],$$

$$p_1 y_v(t) = p_v y_v(t) + \frac{1}{2}N_{1y}[y_v]N_1[y_v],$$

Вычисляя вторые слагаемые по формуле, представим матрицу A и p_1 :

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & \dots & 0 & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 1 \\ -a_{l1} & -a_{l2} & \dots & \dots & -a_{ll-1} & -a_{ll} \end{bmatrix}, \quad p_1 = p_v + \frac{1}{2}\sigma_0^2$$

где коэффициенты последней строки матрицы A определяются соотношениями:

$$a_{li} = -a_{0li} + \frac{1}{2} \sum_{k=1}^l \delta_{lk} \delta_{ik},$$

И окончательно в форме Ито:

$$d\mathbf{z}^v(t) = (A\mathbf{z}^v(t) + b_0 u(t))dt + D_1[\mathbf{z}^v]d\vec{w}(t), \quad t = [0, T], \quad (2.49)$$

$$z(t) = f(t), \quad t = [-\tau_0, 0], \quad \mathbf{z}_i^v(0) = C_i, \quad i = \overline{2, l}$$

$$u(t) = \psi(y(t)), \quad y(t) = \frac{1}{\Delta} y_v(t), \quad (2.50)$$

$$dy_v(t) = [p_1 y_v(t) + c_v x(t - \tau_m)] dt + N_1[y_v] d\eta(t), \quad (2.51)$$

$$x(t) = \vec{q}_0^T \mathbf{z}^v(t - \tau_o)$$

где

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & \dots & 0 & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 1 \\ -a_{l1} & -a_{l2} & \dots & \dots & -a_{ll-1} & -a_{ll} \end{bmatrix}, \quad a_{li} = -a_{oli} + \frac{1}{2} \sum_{k=1}^l \delta_{lk} \delta_{ik}, \quad (2.52)$$

$$p_1 = p_v + \frac{1}{2} \sigma_0^2 \quad (2.53)$$

Таким образом, поведение сигма частотно – импульсной системы автоматического управления температурным режимом процесса вытяжки оптического волокна описывается стохастическими дифференциальными уравнениями Ито (2.49) – (2.51).

2.5 Экспериментальное исследование модели стохастических систем с сигма частотно – импульсной системой автоматического управления для объекта с запаздыванием

Для проверки адекватности полученной математической модели Σ -ЧИСАУ в форме стохастических дифференциальных уравнений в форме Ито проводится компьютерное статистическое моделирование методом Монте-Карло [81].

Непрерывная часть типовой системы описывается уравнением вида:

$$\dot{z}(t) = [a_0 + \mu(t)]z(t) + bu(t), \quad x(t) = z(t - \tau_o) \quad (2.54)$$

где $z(t)$ - выходная координата системы; a_0, b - постоянные коэффициенты; τ_o - время запаздывания управляемого объекта; $u(t)$ - управляющее воздействие; $\mu(t)$ - параметрический белый шум с нулевым средним и интенсивностью σ^2 .

Модулятор описывается соотношениями:

$$y_v(t_{n+1} - 0) = c_v \int_{t_n + \tau_o}^{t_{n+1} - 0} \exp(-p_v(t_{n+1} - \tau)) x(\tau - \tau_m) d\tau = \lambda_{n+1} \Delta \quad (2.55)$$

$$\lambda_{n+1} = \text{sign } y_v(t_{n+1} - 0), \quad y_v(t_{n+1} + 0) = 0,$$

где $x(t) = -z(t)$.

Для моделирования системы с Σ -ЧИСАУ с запаздыванием уравнение (2.54) преобразуется в стохастическое дифференциальное уравнение Ито следующим образом: подставляем вместо $\mu(t) = \delta_{00}\dot{w}(t)$, где $w(t)$ - винеровский процесс, записываем в дифференциальной форме, учитывая, что дифференциал случайного процесса будет в форме Стратоновича [82].

$$dz(t) = [a_0 z(t) + bu(t)]dt + \delta_{00} z(t) d^* w(t),$$

Переходя к дифференциалу Ито получим:

$$dz(t) = [az(t) + bu(t)]dt + \delta_{00} z(t) dw(t), \quad t = [0, T] \quad (2.56)$$

$$z(t) = f(t), t = [-\tau_0, 0],$$

где $w(t)$ - стандартный винеровский процесс, $a = a_0 + \frac{1}{2}\delta_{00}^2$ - коэффициент сноса.

Стохастические дифференциальные уравнения Ито, описывающие систему с Σ -ЧИСАУ (рисунок 2.7) в соответствии с результатами п.2.2 и п.2.3 представляются в виде:

$$dx = [ax(t) + bu(t)]dt + \delta_{00} x(t) dw(t), x(t) = x(t - \tau_0) \quad (2.57)$$

$$u(t) = \psi\left(\frac{y_v(t)}{\Delta}\right) \quad (2.58)$$

$$dy_v(t) = \left[\left(p_v + \frac{1}{2}\sigma_0^2\right)y_v(t) + c_v x(t - \tau_m)\right]dt - \sigma_0 y_v(t) d\eta(t), \quad (2.59)$$

где функция $\psi(y)$ задана уравнением (2.8).

Обобщенная блок-схема экспериментального исследования систем управления с Σ -ЧИМ методом Монте-Карло (имитационного моделирования) показана на рисунке 2.8.

Суть вычислительного эксперимента заключается в статистическом цифровом моделировании стохастической системы автоматического управления с Σ -ЧИСАУ на основе двух типов ее математического описания: соотношениями (2.55) - (2.56) и уравнениями (2.57) - (2.59) при различных значениях интенсивности σ_0 [83].

Процедура экспериментального исследования состоит из следующих этапов [84]:

1. статистическое моделирование типовой системы с Σ -ЧИС по уравнениям (2.55) - (2.56);

2. численное решение соответствующих стохастических дифференциальных уравнений (2.57) - (2.59).

3. Сравнение статистических характеристик выходного сигнала типовой системы с Σ -ЧИМ и ее модели, т.е. математических ожиданий $m_z(t), m_{zi}(t)$ и дисперсии $D_z(t), D_{zi}(t)$.

Моделирующий алгоритм, реализующий первый этап представлен на рисунке 2.9. Для моделирования Σ -ЧИМ используется разностная аппроксимация уравнения фильтра по формуле:

$$y_{i+1} = f_1 x_{i+1} + f_2 x_{i+1} + f_3 y_i \quad (2.60)$$

Где

$$x_i = z_i; \quad f_1 = \frac{c_v h}{2p_v}; \quad f_2 = \frac{c_v h}{2p_v} e^{-p_v h}; \quad f_3 = e^{-p_v h}$$

c_v и p_v – постоянные коэффициенты, h - шаг интегрирования, который выбирается экспериментально. Импульсное устройство с постоянным порогом Δ моделируется в соответствии с логикой работы модулятора.

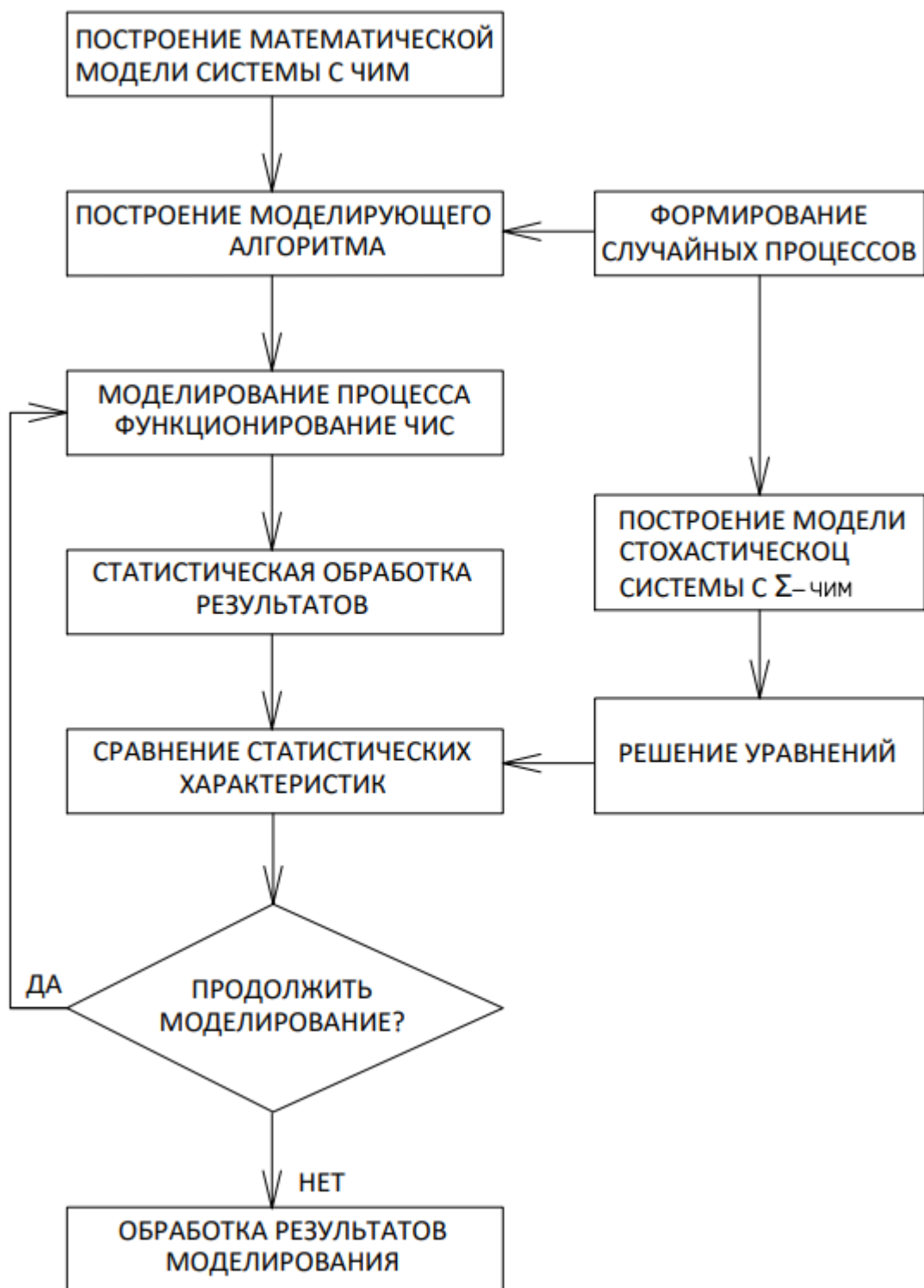


Рисунок 2.8 - Блок-схема алгоритма экспериментального исследования моделей стохастических систем с Σ -ЧИСАУ

Для численного решения стохастического дифференциального уравнения (2.56) используется модифицированный метод Эйлера. Метод Эйлера аппроксимирует стохастическое дифференциальное уравнение (2.56) с

точностью $o(\sqrt{h})$. Для повышения точности используется следующая разностная аппроксимация:

$$z_{i+1} = z_i + (az_i + bu(y_i))h + \delta_{00}z_i\Delta w_i + \frac{1}{2}\delta_{00}^2z_i(\Delta w_i)^2 \quad (2.61)$$

которая имеет точность $o(h)$. Приращения винеровского процесса Δw_i получаем по формуле:

$$\Delta w_i = \zeta_i\sqrt{\sigma^2h}, \quad i = 0, 1, 2, \dots \quad (2.62)$$

Здесь ζ_i - независимые случайные величины, распределенные по нормальному закону с нулем средним и единичной дисперсией. Эти числа вырабатываются с помощью подпрограмм равномерных нормальных чисел.

Решение системы стохастических уравнений Ито (2.57) - (2.59) производится методом Эйлера по алгоритму (2.65) [85].

Приращения независимых винеровских процессов Δw_i и $\Delta \eta_i$ формируется по формуле (2.62).

На третьем этапе для сравнения вычисляются оценки статистических характеристик (математического ожидания и дисперсии) выходного сигнала типовой системы с Σ -ЧИСАУ и ее модели в дискретные моменты времени $t_1, t_2, \dots, t_n$. Эти моменты времени выбираются равностоящими $\Delta t = 0.02$. Выходной случайный процесс представляется множеством из 50 реализаций, полученных при одинаковых условиях.

Оценки математического ожидания и дисперсии для сечений случайного процесса в дискретные моменты времени t_i определяются, по формулам:

$$m_z(t_i) = \frac{1}{N} \sum_{v=1}^N z_v(t_i) \quad (2.63)$$

$$D_z(t_i) = \frac{1}{N-1} \sum_{v=1}^N [z_v(t_i) - m_z(t_i)]^2 \quad (2.64)$$

где $i = 1, 2, \dots, m$.

Параметры метода статистического цифрового моделирования (N - объем выборки, Δt - шаг дискретизации) выбраны экспериментально так, чтобы для заданного значения доверительной вероятности $\beta = 0,95$ получить относительную погрешность вычисления меньше 5% [86].

Приведем основные параметры статистической модели исследуемой системы с Σ -ЧИСАУ: параметры модулятора $p_v = 10, c_v = 4, \Delta = 2$; объект управления с постоянным запаздыванием $\tau_0 = 1, a = 2, b = 1, \mu(t) -$

параметрический белый шум, т.е. нормально распределенный случайный процесс с нулевым средним и стандартным отклонением 1.

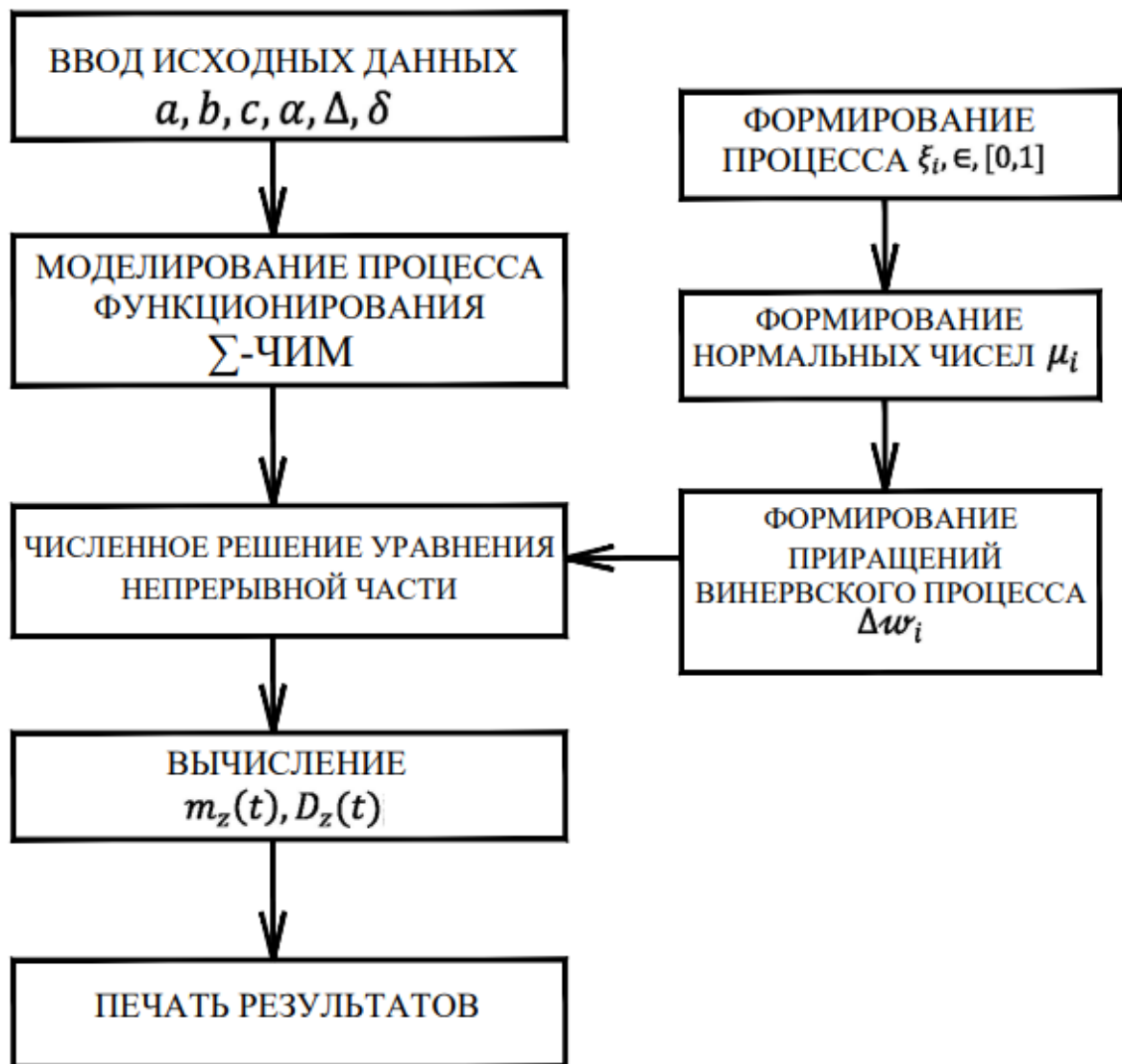


Рисунок 2.9 - Моделирующий алгоритм метода Монте-Карло

Моделирующий алгоритм, реализующий 2-й этап экспериментального исследования, представлен на рисунке 2.10. Решение системы стохастических уравнений Ито (2.49) - (2.51) производится методом Эйлера по алгоритму (2.61).

Приращения независимых винеровских процессов Δw_i и $\Delta \eta_i$ формируется по формуле (2.62).

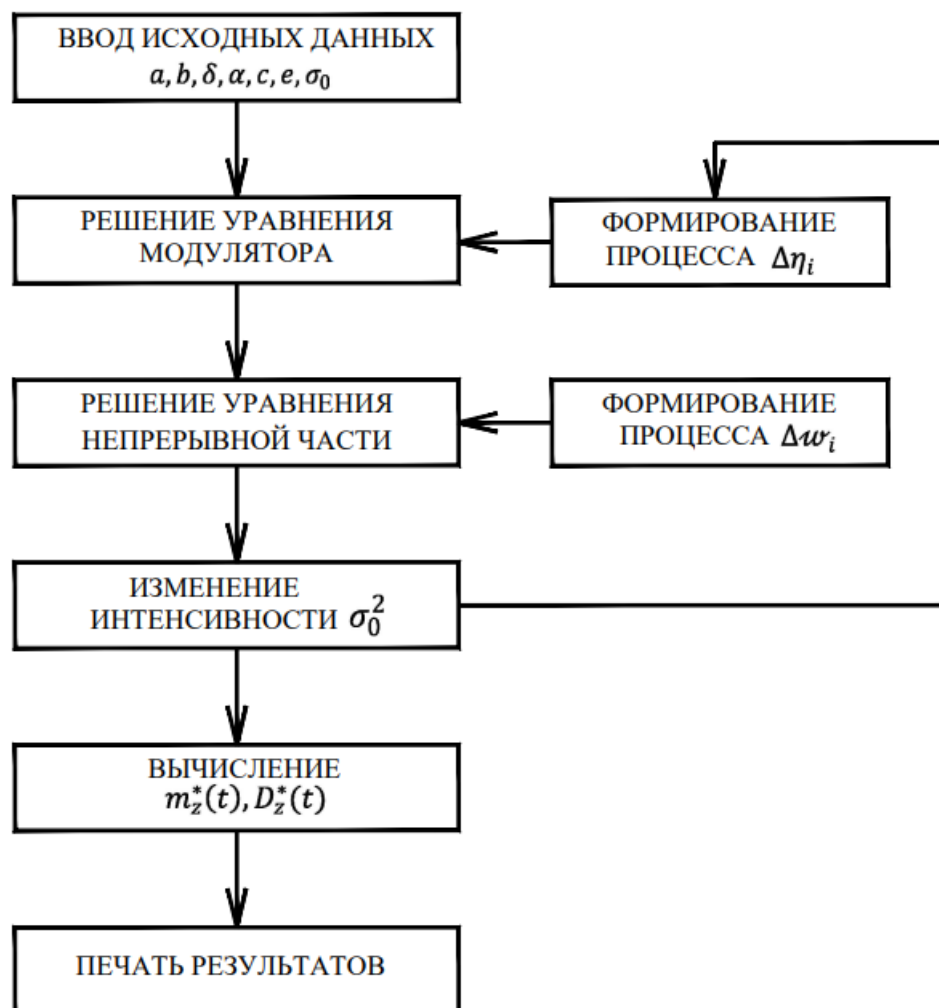


Рисунок 2.10 - Алгоритм экспериментального исследования модели стохастической системы с Σ -ЧИМ

Для применения метода Монте-Карло мы должны многократно выполнять процедуру численного интегрирования дифференциального уравнения с запаздыванием (2.56). Шаг выбран экспериментально $g = 0,02$ поэтому нам необходимо задать такое число случайных реализаций каково число N частичных интервалов $N = \tau/g$, т.е. $N = 50$. При уменьшении g число N растет увеличивается необходимо число реализаций.

Решение дифференциального уравнения (2.56), описывающего модулятор производится при различных значениях интенсивности σ_0^2 случайного процесса $\eta(t)$, который имитирует операцию "сброс". Поэтому для выбора значения интенсивности σ_0^2 проведен эксперимент, результаты которых представлены на рисунке 2.11. Как видно из рисунка наиболее близко решение стохастического уравнения при значении интенсивности $\sigma_0^2 = 3,5$ что подтверждает теоретическое обоснование модели, изложенной в пункте 2.4.

Следует отметить, что при малых значениях интенсивности реализации типовой системы с ЧИМ намного расходятся с решением стохастического уравнения, при значениях $\sigma_0^2 \geq 4.0$ система теряет устойчивость.

Таким образом важнейшей задачей дальнейшего исследования является определение области устойчивости стохастической системы с запаздыванием.

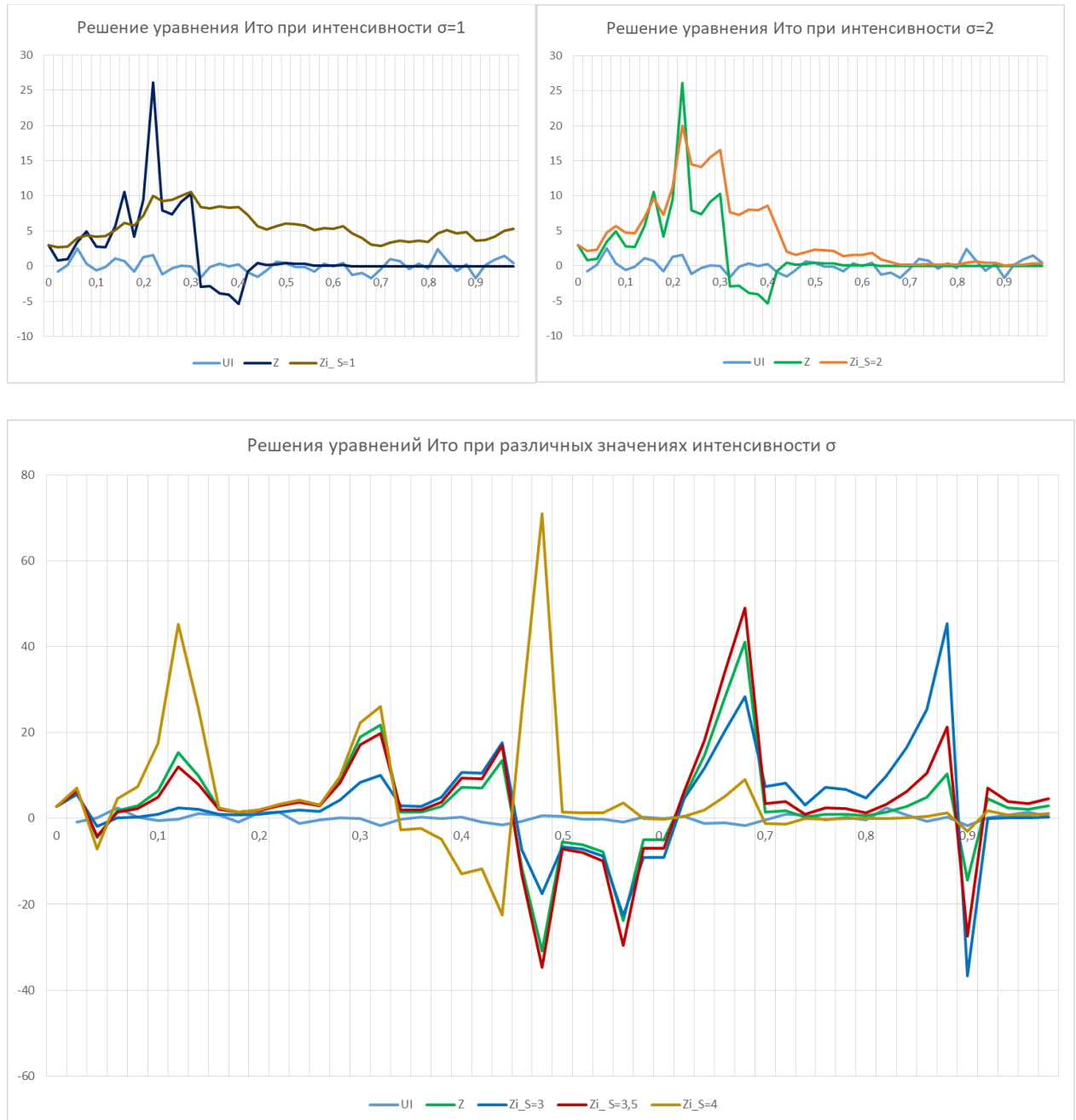


Рисунок 2.11 - Решения уравнений Ито при различных значениях интенсивности σ_0^2

Решение дифференциального уравнения с запаздыванием показывает, что за время отсутствия управления под воздействием случайного процесса $\mu(t)$ объекта управления осуществляет свободный дрейф, который

существенно влияет на дальнейшее поведение системы с Σ -ЧИСАУ рисунок 2.12.

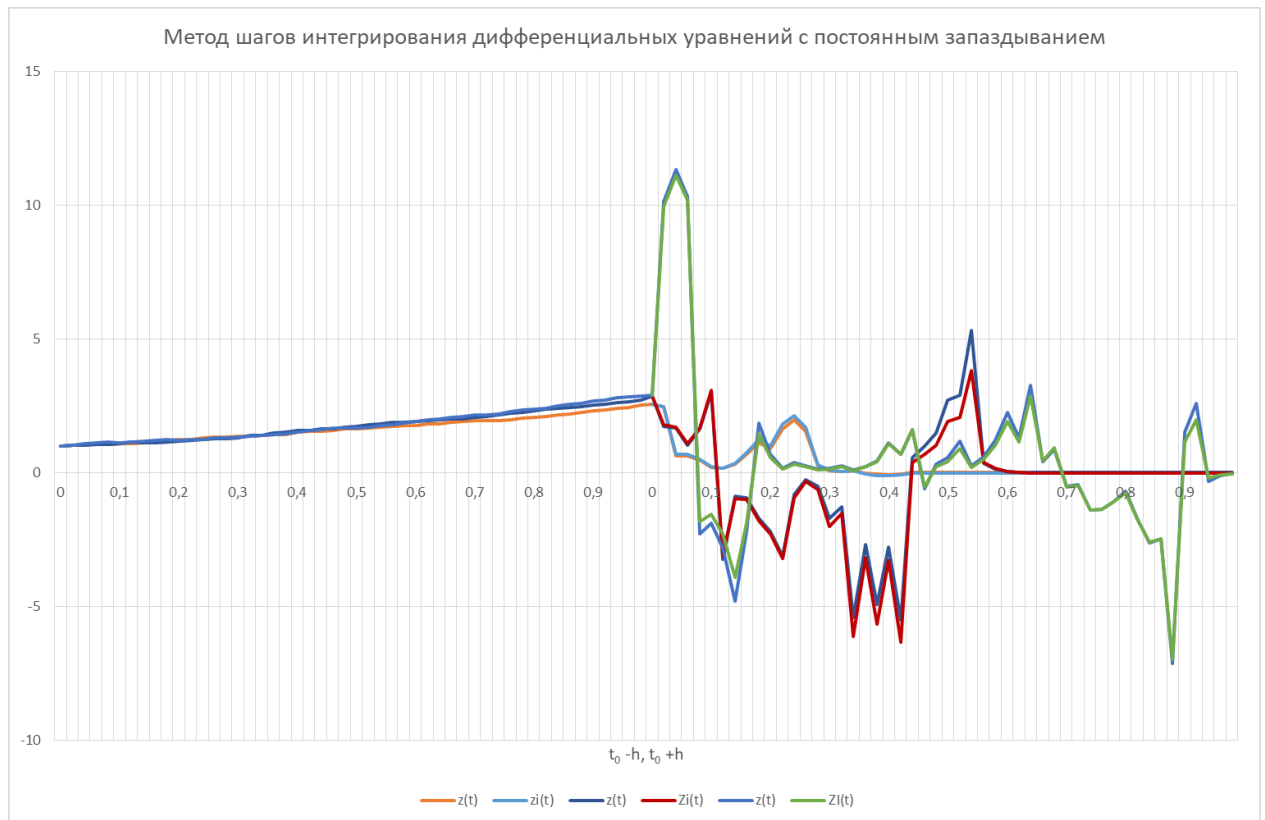


Рисунок 2.12 - Решения дифференциальных уравнений с запаздыванием

Под влиянием случайного процесса $\mu(t)$ объект может перейти в состояние неустойчивости, что показывает реализация исследуемого процесса. При условии, когда конечное условие решения дифференциального уравнения с запаздыванием достигает значения, значительно возрастает размах решения стохастического уравнения (2.49) - (2.51).

На рисунке 2.13 представлены реализации решения стохастического уравнения при начальных условиях $z_0(t) = 3,109311156$, $z_0(t) = 2,92708839$ и соответствующие им максимальные значения $z_{max}(t) = 22,67993139$ и $z_{max}(t) = 124,9317658$, которые намного превышают решения дифференциального уравнения в период запаздывания, поэтому в дальнейших экспериментах не представляются графически.

На третьем этапе для сравнения вычисляются оценки статистических характеристик (математического ожидания и дисперсии) выходного сигнала типовой системы с Σ -ЧИСАУ и ее модели в дискретные моменты времени $t_1, t_2, \dots, t_n$. Эти моменты времени выбираются равностоящими $\Delta t = 0.02$. Выходной случайный процесс представляется множеством из 50 реализаций, полученных при одинаковых условиях.

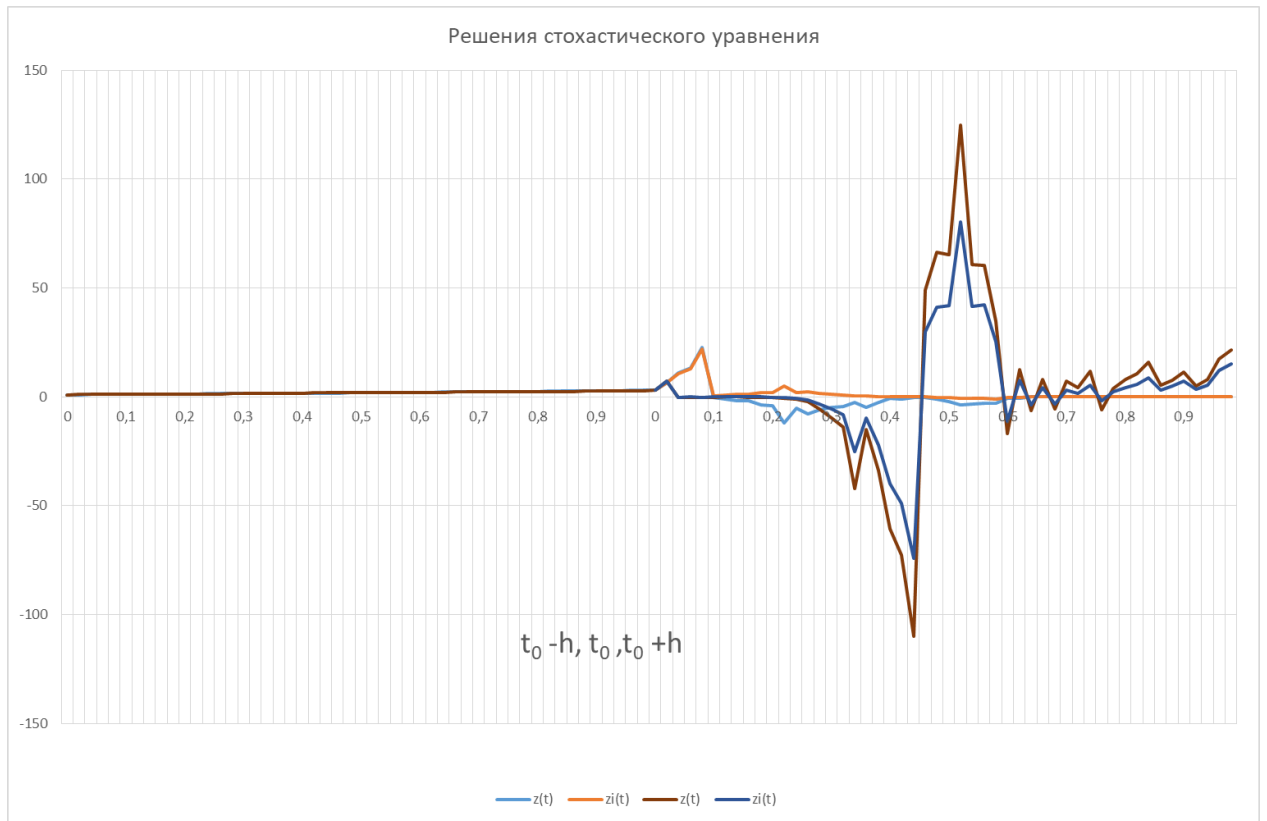


Рисунок 2.13 – Реализации исследуемых процессов в системе с Σ -ЧИСАУ

Оценки математического ожидания и дисперсии для сечений случайного процесса в дискретные моменты времени определяются, по формулам (2.67) и (2.68).

Пользуясь оценками статистических характеристик случайных процессов можно оценить точность и достоверность метода Монте-Карло.

Рассмотрим ошибку этого метода в случае определения искомой величины по оценке вероятности появления некоторого события «А». Принимая относительную частоту $P^* = m/n$ в качестве оценки вероятности события «А», по известным формулам [53, с.275] найдем математическое ожидание и дисперсию ошибки (ошибку будем обозначать ε):

$$M |\varepsilon| = M |P^* - P| = 0 \text{ и } D(\varepsilon) = \frac{p(1-p)}{n} \quad (2.65)$$

Предположим, что ошибка ε имеет нормальный закон распределения (практически это предположение справедливо, когда значения np и $n(1-p)$ больше четырех). Тогда доверительную вероятность ρ при заданных доверительных интервалах $\pm\delta$ найдём по формуле:

$$P(|\varepsilon| < \delta) = P(-\delta < \varepsilon < \delta) = 2\Phi\left(\frac{\delta}{\sigma_\varepsilon}\right) = \rho \quad (2.66)$$

где $\Phi(t)$ – интеграл плотности от 0 до t (функция Лапласа), а $\sigma_\varepsilon = \sqrt{D\varepsilon}$ -- среднее квадратическое отклонение.

При заданной доверительной вероятности ρ величину δ определим по формуле:

$$\delta = \sqrt{\frac{p(1-p)}{n}} \cdot t_\rho \quad (2.67)$$

где $t_\rho = \Phi^{-1}\left(\frac{\rho}{2}\right)$.

Для величины t_ρ составлены таблицы в зависимости от ρ . Из формулы (2.67) можно найти число опытов, обеспечивающее заданные значения ρ и δ .

$$n = \frac{p(1-p)}{\delta^2} \cdot t_\rho^2 \quad (2.68)$$

Так как мы выбрали число n по величине шага интегрирования, то оценим ошибку δ при доверительной вероятности $\rho = 0.99$ и табличного значения $t_\rho = 2,67955$ по формуле (2.67) получим $\delta = 0,037704611$.

Приведем основные параметры статистической модели исследуемой системы с Σ -ЧИСАУ: параметры модулятора $p_v = 10$, $c_v = 4$, $\Delta = 2$; объект управления с постоянным запаздыванием $\tau_0 = 1$, $a = 2$, $b = 1$, $\mu(t)$ - параметрический белый шум, т.е. нормально распределенный случайный процесс с нулевым средним и стандартным отклонением $\delta_{00} = 1$.

Выходной случайный процесс $z(t)$ получается решением уравнения (2.56).

Рассмотрим подробно одну реализацию исследуемых процессов статистической модели, приведенной на рисунке 2.14. Здесь -U1 - выходные сигналы модулятора, точнее импульсы БФИ, представляющие собой последовательность положительных и отрицательных единиц (черные точки на графике); -U1 -соответствующие им случайные процессы в уравнении Ито, имитирующие работу БФИ (крестики на графике); -Z - случайные процессы на выходе объекта управления полученный от воздействия управляющих импульсов модулятора и наконец, -Z1 - решение стохастического уравнения Ито эквивалентной системы с Σ -ЧИСАУ.

Таким образом, задача экспериментального моделирования заключается в том, чтобы реализовать 50 реализации работы системы с Σ -ЧИСАУ и сравним полученные статистические характеристики, точнее математическое ожидание $m_z(t)$ и дисперсию $D_z(t)$ выходных случайных процессов и

соответствующие им характеристики $m_z^*(t)$ и $D_z^*(t)$ решений стохастического уравнения Ито эквивалентной системы с Σ -ЧИСАУ.

Экспериментальный материал для определения оценок статистических характеристик исследуемых случайных процессов $Z(t)$ и $Z^*(t)$ записывается в виде таблицы 2.1, которую можно рассматривать как результат независимых опытов над системой случайных величин $Z_1(t), Z_2(t), \dots, Z_{50}(t)$ и $Z_1^*(t), Z_2^*(t), \dots, Z_{50}^*(t)$.

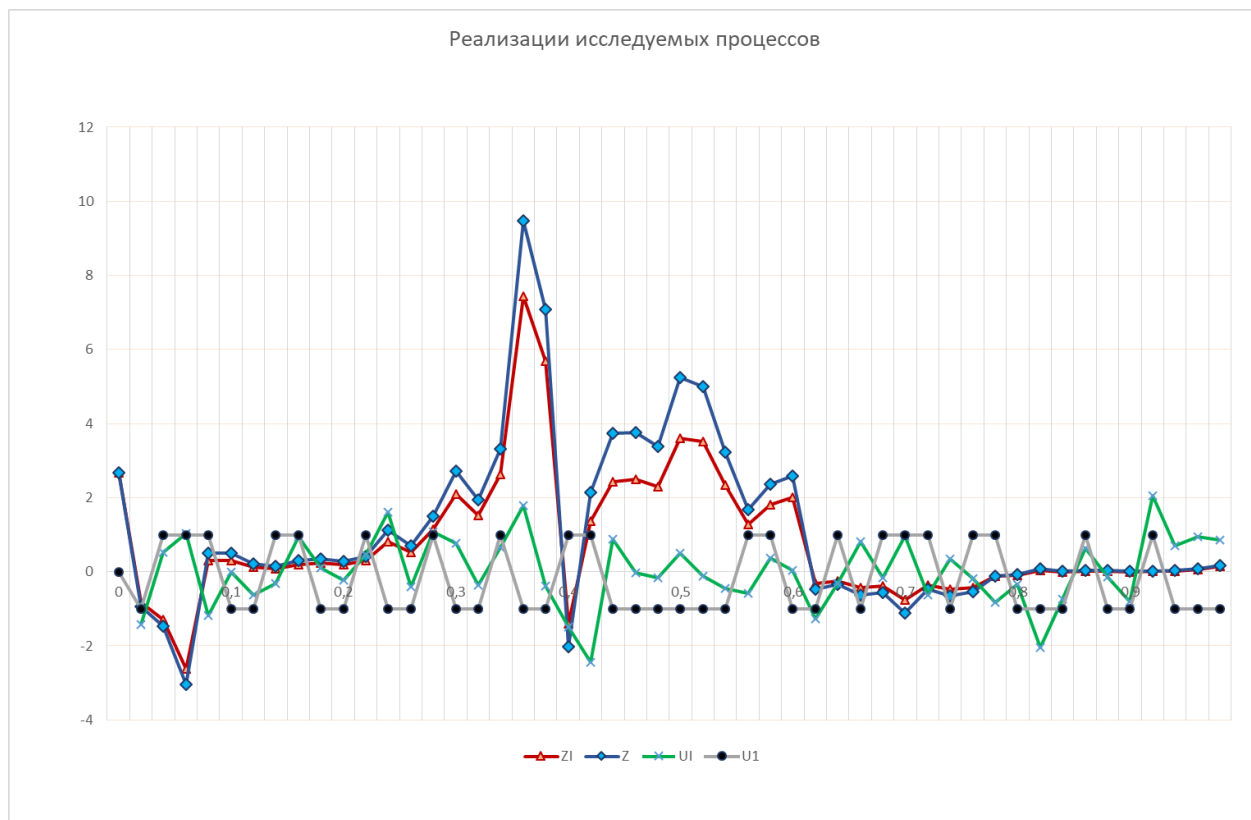


Рисунок 2.14 - Реализация исследуемых процессов системы с Σ -ЧИСАУ

Таблица 2.1 - Результаты исследования случайного процесса

Реализации		Временные точки						
		t_1	t_2	t_3	t_4	...	t_{49}	t_{50}
1		2	3	4	5	6	7	8
1	$Z(t)$	2,465489	0,876275	1,183051	1,896098	...	-4E-05	-6,3E-05
	$Z^*(t)$	2,465489	0,9234	1,24197	1,976034	...	-0,02161	-0,02161
2	$Z(t)$	2,974035	1,034821	-1,08441	-1,89904	...	-0,00179	-0,00232
	$Z^*(t)$	2,974035	1,095095	-1,10878	-1,89978	...	-0,02314	-0,02359
3	$Z(t)$	2,618613	-0,83188	-1,62799	-4,2946	...	9,58E-06	-4,1E-06
	$Z^*(t)$	2,618613	-0,73454	-1,40453	-3,62312	...	-0,02156	-0,0216

Продолжение таблицы 2.1

	1	2	3	4	5	6	7	8
	$Z(t)$	...	...	...	...	...	...	...
	$Z^*(t)$	...	...	...	...	...	...	...
49	$Z(t)$	2,828183	4,99314	2,145392	-0,90918	...	-0,0243	0,000467
	$Z^*(t)$	2,828183	4,94185	2,221077	-0,85768	...	-0,04604	-0,02204
50	$Z(t)$	2,703533	2,83432	4,612713	2,10047	...	-2,2E-05	-2,3E-05
	$Z^*(t)$	2,703533	2,837503	4,576981	2,170281	...	-0,02157	-0,02157

Совокупность сечений в каждой временной точке t_{ij} (столбец матрицы), представляет собой случайные числа некоторой случайной величины в общем случае со своими законами распределения, математическими ожиданиями, дисперсиями:

$$m_z^*(t_j) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N z_i(t_j), \quad D_{z(t_j)} = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N [z_i(t_j) - m_z^*(t_j)]^2$$

При решении практических задач последовательности этих оценок математических ожиданий и дисперсий, определенных в точках $t_1, \dots, t_m$, достаточно полно представляют моделируемый случайный процесс. Оценки математических ожиданий $m_z^*(t_j)$ и дисперсий $D_z(t_j)$ можно аппроксимировать подходящими кривыми в предположении непрерывности процесса. Поэтому для проверки адекватности процессов типовой системы с Σ -ЧИСАУ и ее модели в виде стохастических дифференциальных уравнений Ито будем сравнивать распределения их математических ожиданий и дисперсий.

Предполагая, что ошибка ε имеет нормальное распределение, доверительные вероятности для оценок математического ожидания и дисперсии можно приближенно найти по формуле (2.67), если в ней соответственно принять значение σ_ε по формулам:

$$\sigma_m = \sqrt{\frac{D_z}{N}} \text{ и } \sigma_D = \sqrt{\frac{2}{N-1}} D_z \quad (2.69)$$

Результаты. На рисунке 2.15 приведены оценки математического ожидания $m_z(t)$ типовой системы с Σ -ЧИСАУ и ее стохастической модели $m_z^*(t)$ при значении интенсивности $\sigma_0^2 = 3,5$, на рисунке 2.16 приведены соответствующие оценки дисперсии $D_z(t)$ и $D_z^*(t)$ выходного сигнала $z(t)$.

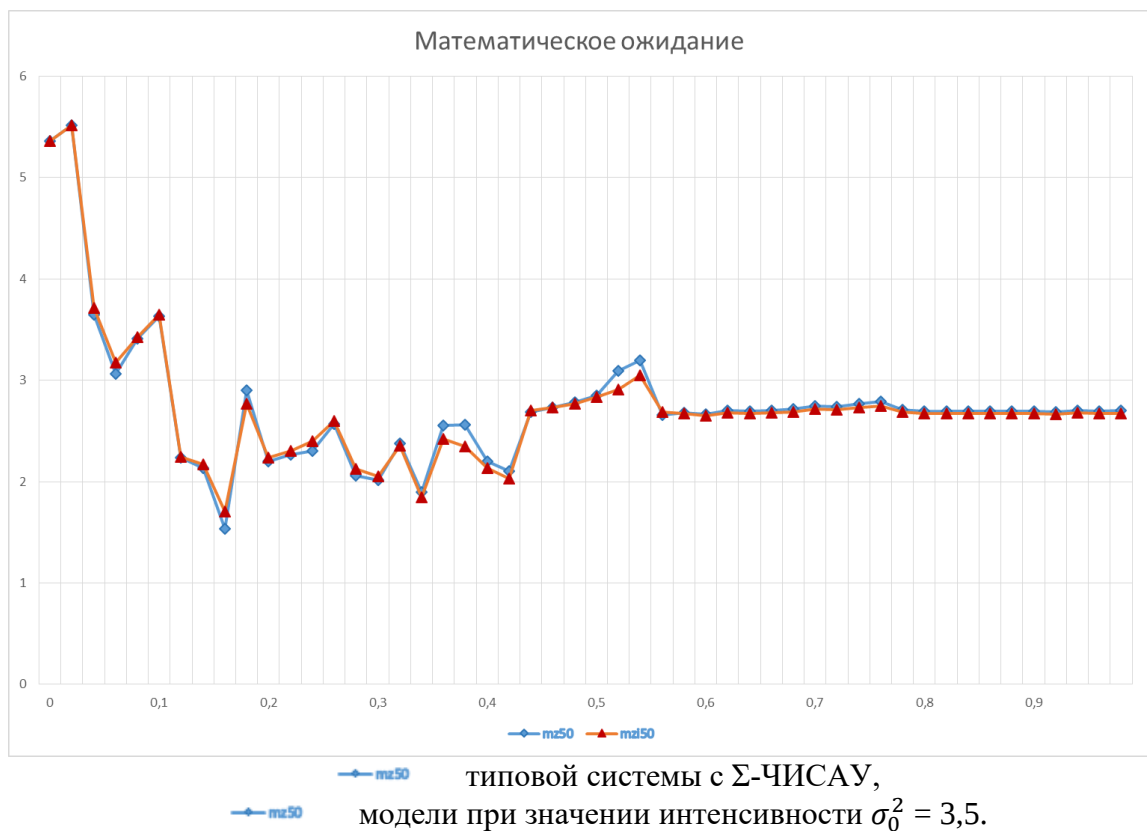


Рисунок 2.15- Математические ожидания выходного процесса

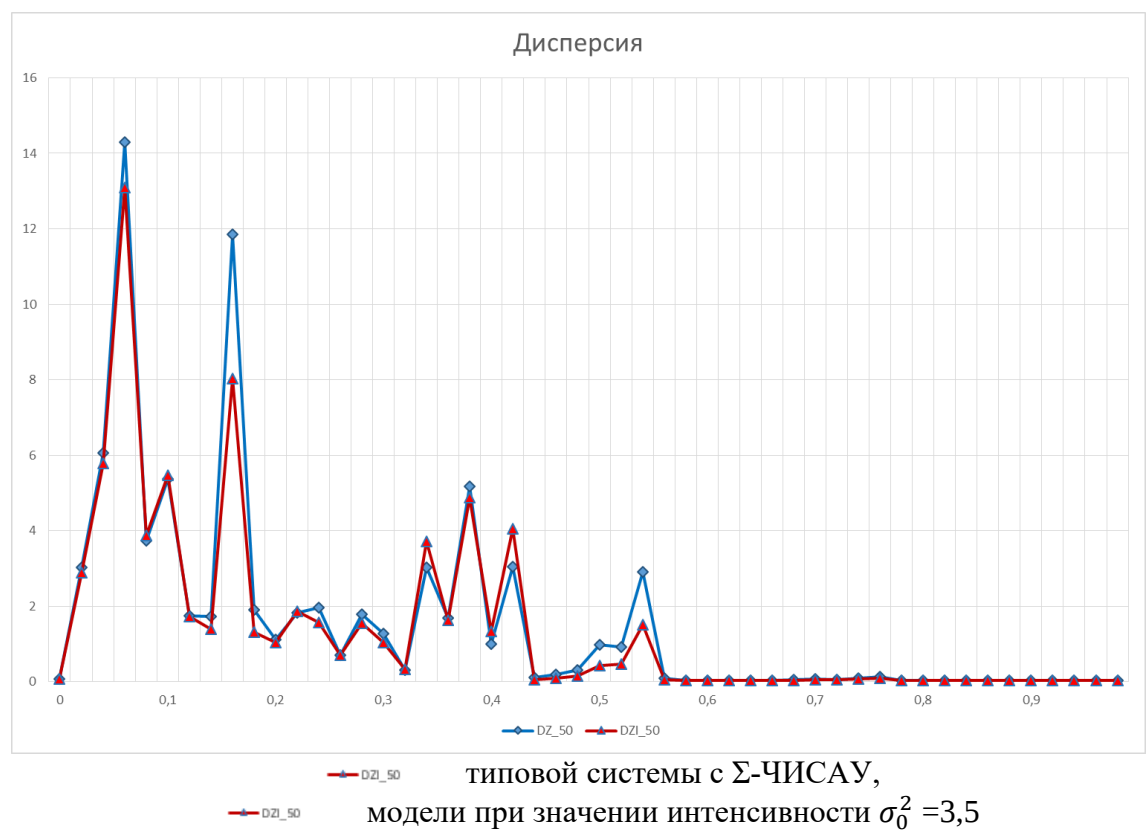


Рисунок 2.16 - Дисперсии выходного процесса

Оценка характеристик случайных величин и процессов типовой системы с Σ -ЧИСАУ и ее модели приедена в таблице 2.2.

Таблица 2.2 - Характеристики случайных величин и их оценки

Характеристика	Оценка	Система с Σ -ЧИСАУ	Стохастической модели
Математическое ожидание	$m_z^*(t_j) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N z_i(t_j)$	2,747796135	2,73234098
Дисперсия	$D_{z(t_j)} = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N [z_i(t_j) - m_z^*(t_j)]^2$	1,58842666	1,423449321
Среднее квадратическое отклонение	$\sigma_m = \sqrt{\frac{D_z}{N}}$ и $\sigma_D = \sqrt{\frac{2}{N-1}} D_z$.	0,178237295 и 0,254624707	0,168727551 и 0,241039358
Точность оценки	$\delta = \frac{t_y \sigma}{\sqrt{n}}$	0,067552371 и 0,063948155	0,096503387 и 0,091354507
Доверительный интервал:	m_z ,	$2,68 < m_z < 2,82$	$2,668 < m_z < 2,796$
Доверительный интервал:	D_z	$1,49 < D_z < 1,685$	$1,332 < D_z < 1,515$

Таблица 2.3 - Двухвыборочный F-тест для дисперсии

	Системы с Σ -ЧИСАУ	Стохастической модели
	<i>Переменная 1</i>	<i>Переменная 2</i>
Среднее	1,58842666	1,423449321
Дисперсия	7,977413888	6,138781992
Наблюдения	50	50
df	49	49
F	1,299510864	
$P(F \leq f)$ одностороннее	0,181147996	
F критическое одностороннее	1,607289463	

Как видно из этих оценок при значении интенсивности $\sigma_0^2 = 3,5$ имитирующего сигнал «сброса», оценки статистических характеристик выходного сигнала $z(t)$ типовой системы с Σ -ЧИСАУ и ее модели в виде стохастических дифференциальных уравнений Ито достаточно близки, т.е. модель адекватна исходной системе [79, с.378]. Причем оценки характеристик случайных величин и процессов стохастической модели мажорируют аналогичные параметры типовой системы с Σ -ЧИСАУ, что подтверждает теоретическое обоснование модели, приведенные в параграфе 2.4.

Имея ряд значений $m_z^*(t_1), m_z^*(t_2), \dots, m_z^*(t_{50})$ и $D_z(t_1), D_z(t_2), \dots, D_z(t_{50})$ можно построить функции математических ожиданий $m_z(t)$ и дисперсий $D_z(t)$. Аналогом, моделью плотности распределения вероятности случайной величины является гистограмма, которую можно построить (аналитически или графически) по данным имитационного моделирования.

Сравнение распределения функции математического ожидания и дисперсии типовой системы с Σ -ЧИСАУ с аналогичными характеристиками стохастической модели, приведенные на рисунке 2.17, показывают, что они принадлежат к близким функциям распределения вероятности случайных величины. При этом можно сказать, что поведение этих систем подчинятся одним и тем же случайным процессам.

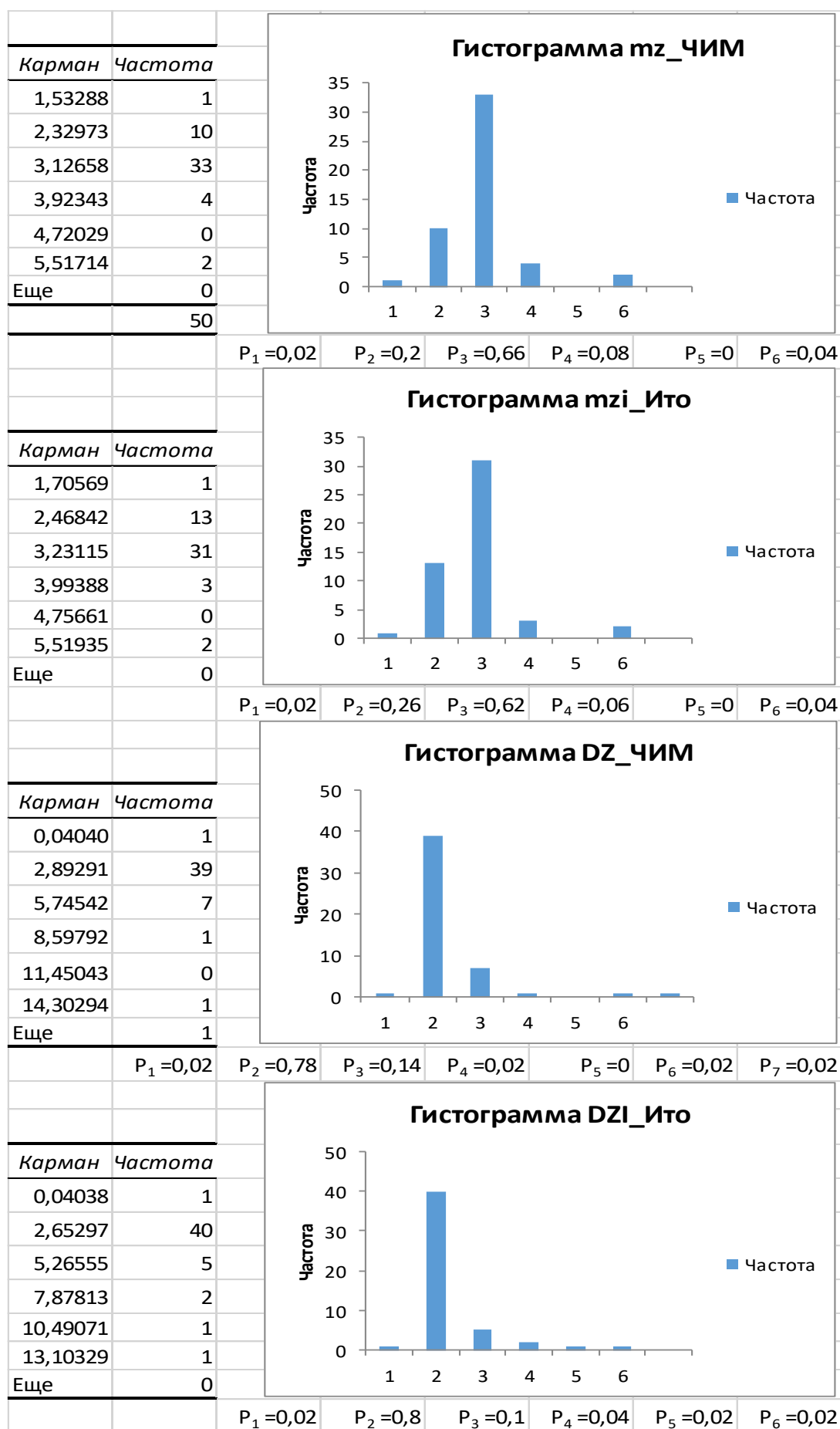


Рисунок 2.17 – Гистограммы плотности распределения вероятности

Как видно из этих оценок при значении интенсивности $\sigma_0^2 = 3,5$ имитирующего сигнал «сброса», оценки статистических характеристик выходного сигнала $z(t)$ типовой системы с Σ -ЧИСАУ и ее модели в виде стохастических дифференциальных уравнений Ито достаточно близки, т.е. модель адекватна исходной системе [79, с.379]. Причем оценки характеристик случайных величин и процессов стохастической модели мажорируют аналогичные параметры типовой системы с Σ -ЧИСАУ, что подтверждает теоретическое обоснование модели, приведенные в параграфе 2.4.

Полученные стохастические дифференциальные уравнения (2.49) - (2.51) дают возможность применить аппарат прямого метода Ляпунова для исследования асимптотического поведения динамической частотно-импульсной системы управления объектами с запаздыванием, а также провести синтез данного класса систем.

Выводы по второй главе

Основные результаты, полученные во второй главе:

1. Обоснована необходимость разработки новых классов математических моделей стохастических частотно – импульсных систем автоматического управления объектами с запаздыванием;
2. Обозначены этапы процедуры параметрического синтеза Σ -ЧИСАУ температурным режимом высокотемпературной печи вытяжки оптического волокна;
3. Дано описание принципа действия Σ -частотно-импульсной системы управления объектами с запаздыванием;
4. Построена эквивалентная стохастической модели сигма частотно - импульсной системы с запаздыванием, где модулятор заменяется нелинейной системой, процессы которой, эквивалентны исходному модулятору.
5. Описана процедура мажорирующей системы, характеризуемой более простой структурой. Эти системы отличаются от исходных тем, что в них показатели состояния, вызванные внутренними нелинейными преобразованиями случайных процессов, оцениваются внешними аддитивными и мультипликативными случайными шумами.
6. Построена математическая модель Σ -ЧИСАУ объектами с запаздыванием в виде стохастических дифференциальных уравнений Ланжевена.
7. Построена математическая модель Σ -ЧИСАУ объектами с запаздыванием в форме стохастических дифференциальных уравнений в форме Ито.
8. Проведено экспериментальное исследование математической модели стохастических систем с Σ -ЧИСАУ для объекта с запаздыванием.
9. Даны этапы статистического цифрового моделирования стохастической системы автоматического управления с Σ -ЧИСАУ.

10. Полученные, в результате экспериментального исследования, оценки показывают, что разработанные модели адекватны исходной системе.

11. Полученные математические модели дают возможность провести синтез данного класса систем.

12. Результаты исследований, представленные во второй главе, опубликованы в [58, 61, 62, 63, 66, 70, 73, 74, 77, 79, 84].

3 Σ - ЧАСТОТНО – ИМПУЛЬСНАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМ ПРОЦЕССОМ ВЫТЯЖКИ ОПТИЧЕСКОГО ВОЛОКНА

3.1 Описание этапов технологического процесса производства вытяжки оптического волокна

С целью изучения процессов регулирования и с целью построения автоматизированных систем контроля и управления технологическим процессом, а также с целью тестирования сигма частотно-импульсного регулятора и устройств измерения диаметра и скорости протяжки диэлектрических нитей, был проведен научный эксперимент «Исследование процессов вытяжки оптического волокна».

Основной целью эксперимента было увидеть каким образом влияет изменение температуры в высокотемпературной печи на скорость вытяжки, а в конечном итоге, и на диаметр конечного выпускаемого оптического волокна. Оптические свойства волокна в значительной степени определяются технологическим режимом вытяжки – ее скоростью и натяжением. Объектом управления является зона перетяжки – так называемая луковица. При заданной скорости вытяжки, поддерживаемой приводом тягового колеса, необходимое натяжение вытяжки достигается регулированием температуры высокотемпературной печи (ВТП), в которой происходит плавление нижнего конца вводимой преформы и образование зоны перетяжки.

Эксперимент проходил на технологической установке в лаборатории InPhoTech – innovation photonics technology, действующей в рамках проекта «Усовершенствованная структура фотонных оптических волокон для инновационных телекоммуникационных сетей» в Университете им. Марии Кюри-Склодовской, г.Люблин, Польша.

Технологический процесс изготовления оптических волокон на основе кварцевого стекла делится на два этапа [87]:

1. Изготовление заготовки (преформы);
2. Вытяжка волокна из заготовки на технологической установке, которую также называют башней вытяжки.

Этап изготовления заготовки (преформы)

В нашем случае применяется Модифицированный метод химического парофазного осаждения (Modified Chemical Vapor Deposition - MCVD), принцип производства показан на рисунке 3.2. Данный метод широко применяется для изготовления оптических волокон специального назначения, поскольку он позволяет легко контролировать показатель преломления каждого слоя. Свойства световода можно обеспечить еще в заготовке, а потом сохранить в готовом волокне [87, с.27].

В станок зажимается стеклянная трубка и через нее на первом этапе пропускается хлорид кремния и кислород (на самом деле состав смеси более сложен). Вдоль этой трубки движется кислородно-водородная горелка (рисунок 3.1). В горячей зоне напротив горелки (1500...1700°C) синтезируется

оксид кремния. Образуются, фигурально выражаясь, пушинки окиси, которые дрейфуют из горячей области в более холодную и прилипают к стенке. Этот процесс называется термофорезом. Важно, что осаждение происходит не в месте нагрева пламенем, а перед ним - там, куда пламя еще не дошло. На поверхности трубки образуется пористый слой окиси, и, двигаясь дальше, горелка его проплавляет - остекловывает. Так получается слой чистого стекла [88].



Рисунок 3.1 – Процесс подготовки заготовки (преформы)

Как было отмечено, модифицированный метод химического парового осаждения (MCVD) заключается в процессе образования субмикронных частиц кварца внутри высококачественной вращающейся опорной трубки. В процессе MCVD источником тепла являются расположенные снаружи кислородно-водородные горелки, в то время как в процессе FCVD (метод химического парового осаждения с помощью печи) источником тепла является печь. После того как необходимое число слоев осаждено, подачу хлорида прекращают, температуру пламени горелки увеличивают до 1900°C, трубка «схлопывается» в стержень под действием сил поверхностного натяжения, обычно на том же станке для изготовления заготовок. Таким образом легируют материал световода, создавая в нем градиент коэффициента преломления. Метод MCVD широко применяется для изготовления оптических волокон специального назначения, поскольку он позволяет легко контролировать показатель преломления каждого слоя [11, с.208].

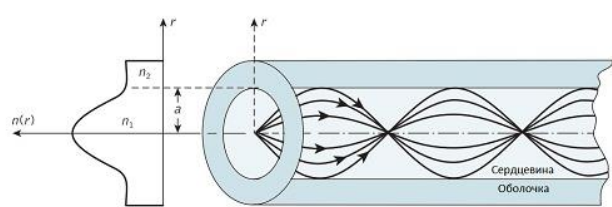


Рисунок 3.2 - Преформа подготовленная по методу MCVD в поперечном сечении

С помощью пульта управления регулируют скорость вращения трубки и скорость, а также направление перемещения горелки (рисунок 3.3).



Рисунок 3.3 – Пульт управления станком подготовки преформы

Достоинством данного способа, является не только получение оптического волокна с сердечником из химически чистого кварца, но и основным преимуществом процесса MCVD является то, что и структуру, и свойства световода можно обеспечить еще в заготовке, а потом сохранить в готовом волокне. Относительные размеры и профиль показателя преломления заготовки передаются готовому волокну в процессе вытягивания. Это осуществляется за счет применения легированного кварца с присадкой титана, германия, бора, фосфора или других реагентов. В зависимости от применяемой присадки показатель преломления волокна может изменяться. Так, германий увеличивает, а бор уменьшает показатель преломления. Подбирая рецептуру легированного кварца и соблюдая определенный объем присадки в осаждаемых на внутренней поверхности трубки слоях, можно обеспечить требуемый характер изменения коэффициента преломления по сечению сердечника волокна [89].

Температуру тепла, подаваемой кислородно-водородной горелкой, измеряют бесконтактным путем с помощью оптического пирометра (рисунок 3.4).

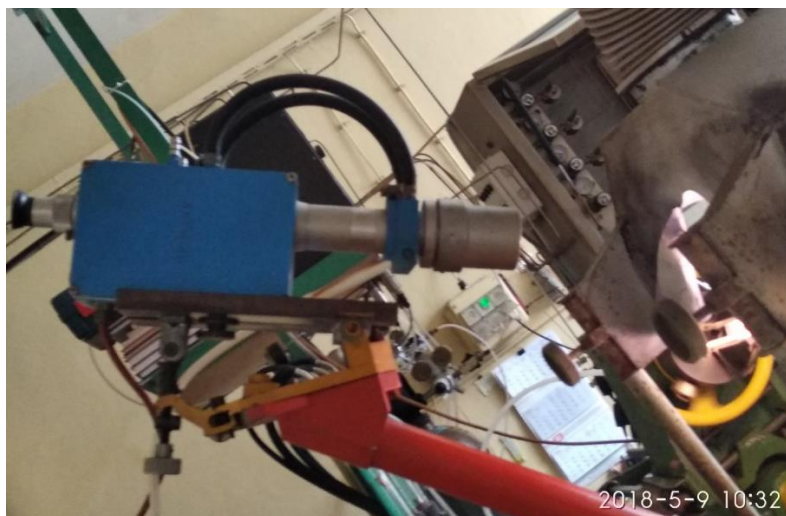


Рисунок 3.4 – Оптический пирометр замеряющий тепло от кислородно-водородной горелки

В развитии процесса изготовления стержней для сердцевины оптических волокон отмечаются шаги по увеличению размера заготовок, повышению производительности, решению проблем, связанных с вызванным наличием гидроксильных групп, затуханием, и новыми конструкциями волокон, требующих новых профилей показателя преломления.

Важными отличительными чертами процесса является следующее:

- постоянное наращивание заготовки;
- точное регулирование расхода сырья;
- поддержание постоянной температуры пламени;
- поддержание постоянной температуры в зоне нагревания заготовки;
- поддержание постоянной скорости поворота заготовки;
- сохранение зоны наращивания заготовки.

Качество изготовленных преформ в большой мере определяется свойствами исходных материалов, и существующее технологическое оборудование не нуждается в дополнительных средствах автоматизации управления.

Этап вытяжки волокна из заготовки на технологической установке

Большое влияние на качество оптического волокна оказывает второй этап - вытяжка волокна из заготовки на технологической установке, которую называют башней вытяжки.

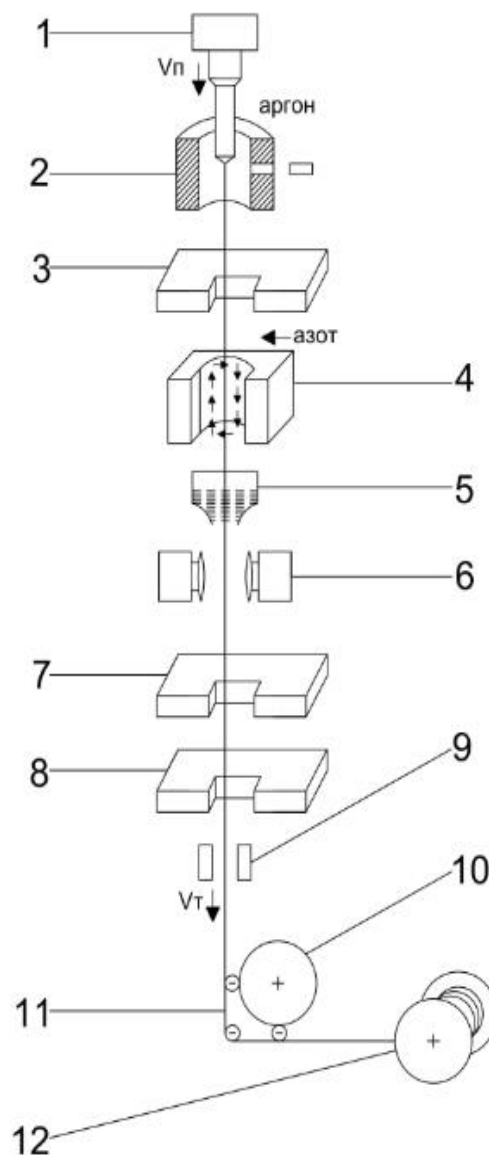
В технологический процесс вытяжки оптического волокна входят следующие операции: нагрев заготовки с плавлением его нижнего конца и формированием зоны перетяжки, так называемой луковичи (капли расплава), вытяжка волокна из зоны перетяжки, контроль и поддержание диаметра и

натяжения вытягиваемого волокна, нанесение слоя лакового покрытия, контроль и поддержание нужной толщины покрытия, его «запекание» и прием на катушку готового волокна [90].

Башня вытяжки оптического волокна фирмы Heathway представлена на рисунке 3.5(а), ее высота составляет 7м. Она оснащена локальными системами автоматического управления скорости подачи преформы, скорости вытяжки, температуры высокотемпературной печи, которые минимизируют влияние возмущающих воздействий, имеющих характер случайных процессов. На рисунке 3.5(б) представлена функциональная схема башни вытяжки.



Рисунок 3.5 - Башня вытяжки оптического волокна и ее функциональная схема, лист 1



б)

1 - механизм подачи заготовки, 2 – высокотемпературная печь, 3 – оптический пирометр, измеряющий $T_{ВТП}$, 4 – бесконтактный лазерный измеритель диаметра, 5 – камера охлаждения, 6 - узел наложения защитного лакового покрытия, 7 - ультрафиолетовая печь полимеризации лакового покрытия, 8 – лазерный измеритель диаметра волокна по лаковому покрытию, 9 – измеритель эксцентricности (толщины) лакового покрытия, 10 – устройство измерения натяжения волокна (бесконтактное устройство измерения скорости протяжки), 11 – тяговое устройство, 12 – приемная катушка с датчиком длины вытянутого оптического волокна

Рисунок 3.5 – лист 2

В верхней части башни размещается механизм подачи заготовки (рисунок 3.6(а)). Консольно закрепленная платформа со скоростью v_n , задаваемой управляемым механизмом подачи заготовки, поступает в графитовую высокотемпературную печь (ВТП) (рисунок 3.6(б)), в нижней

части которой на конце преформы образуется зона перетяжки, конец которой является началом вытягиваемого волокна. Именно зона перетяжки является тем элементом, на который существенным образом влияет режим вытяжки и который определяет основные характеристики вытягиваемого волокна.

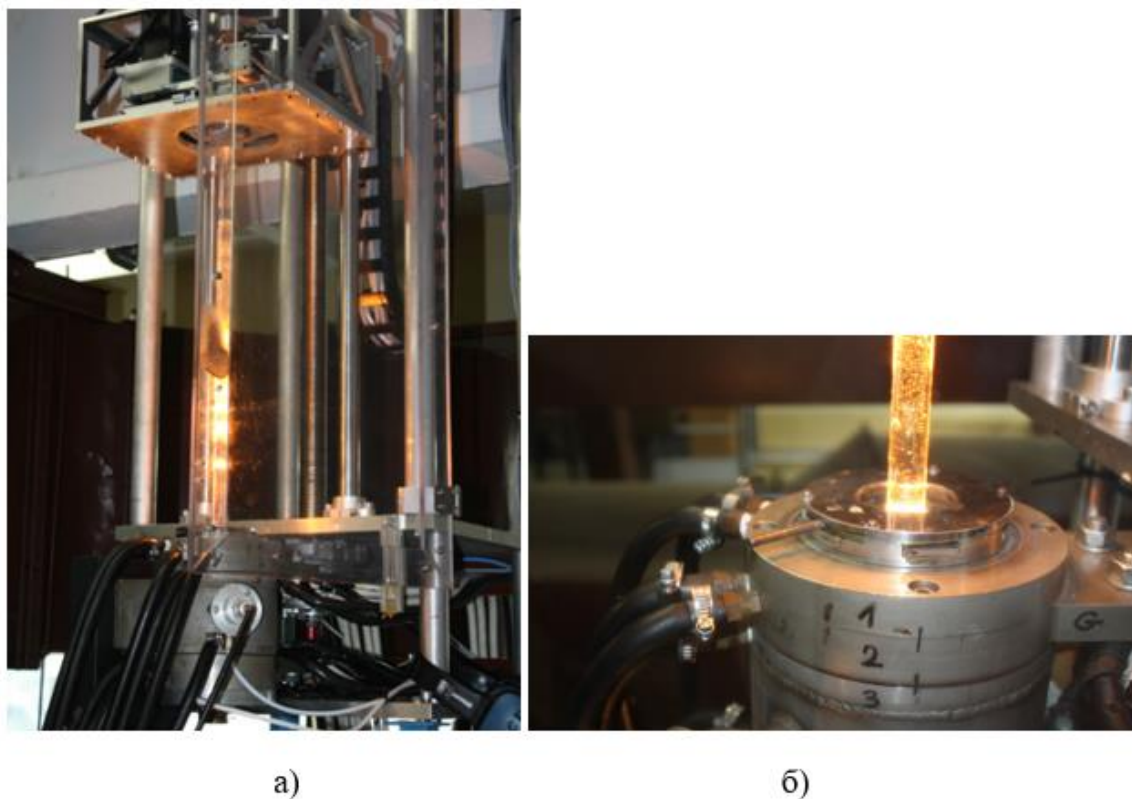


Рисунок 3. 6 - Подача преформы и ее плавление в высокотемпературной печи

Подачу заготовки осуществляют с помощью прецизионного винтового приспособления. Центрирование заготовки по оси X и Y происходит автоматически. Дополнительно предусмотрен ручной режим центрирования заготовки. Узел подачи заготовки может иметь дополнительный привод, обеспечивающий вращение заготовки с одновременным ее продольным перемещением.

В режиме заправки оптического волокна заготовка, вставленная в держатель механизма подачи, опускается в высокотемпературную печь, где нижняя часть заготовки нагревается до температуры чуть выше точки плавления. Чем более узкая высокотемпературная зона создана для плавления кварца, тем лучше. Кроме того, должны быть предприняты меры, чтобы не допустить возникновения центров нагрева (графит или окись циркония), которые могут возникнуть от загрязнения поверхности стекла, поскольку любые посторонние включения, существующие на горячей поверхности слоя образуют микротрещины, приводящие к нарушениям в однородности слоя. Печь для вытяжки ОВ должна обеспечивать оптимальный температурный

градиент для максимального переноса тепла к заготовке в зоне плавления и высокую чистоту атмосферы, окружающей заготовку. Основными источниками тепла для разогрева заготовок являются: печь электрического сопротивления (графит), печь индукционного обогрева (графит), печь на двуокиси циркония и CO₂ лазер. Печь, используемая для вытяжки волокна, должна иметь следующие характеристики: легко регулируемая атмосфера и температура в печи, печь не должна выделять сажу или пыль, посторонние частицы, и другие загрязняющие примеси, она должна выдерживать высокую температуру (2200°C) [89, с.23].

Наша высокотемпературная печь представляет собой графитовую печь сопротивления, которая работает в инертной атмосфере. Рабочая температура печи в зоне нагрева заготовки лежит в пределах 2000...2200°C. В качестве датчика температуры используются оптический пирометр (рисунок 3.7(а)), данные измерения выносятся на измерительно-счетное устройство (рисунок 3.7(б)). Измеряется температура внешней стороны стенки печи, так как внутри печи, в связи с высокой температурой, сделать измерения не имеется возможным. Исходя из технических характеристик печи, знаем, что температура внешней стенки печи в 1600 °C - 1700 °C равна температуре в 2100°C - 2200°C внутри печи.



а)



б)

Рисунок 3.7 – Измерение температуры оптическим пирометром и отображение результата

Часть расплавленного материала, в виде отделившейся от заготовки капли, под действием собственного веса опускается вниз, вытягивая за собой волокно, которое захватывается роликами заправочного механизма. На выходе из печи контроль изменения диаметра волокна осуществляется по показаниям бесконтактного лазерного измерителя диаметра, показанного на рисунке 3.8. Также на данном этапе, оптическое волокно должно быть охлаждено до определенного уровня температуры процесса покрытия лаком. Охлаждение происходит естественным путем, а также, в большинстве случаев, применяют специальные камеры охлаждения, через которые проводят вытягиваемое волокно [91].



Рисунок 3.8 - Бесконтактный лазерный измеритель диаметра оптического волокна

Температура поверхности заготовки и оптоволокна высока в течение всего процесса, поэтому легко могут быть образованы поверхностные трещины и другие дефекты, так как пыль и влажность легко могут попасть на поверхность. Для того, чтобы избежать этого, пластиковая оболочка должна быть нанесена на поверхность волокна немедленно после его получения. По этой причине инструмент для нанесения покрытия расположен сразу после нагревательной печи. Мягкая пластмассовая смола используется для магистрального покрытия, чтобы предотвратить увеличение микроизгибов. Наружный диаметр магистрального покрытия - 0.25 - 0.4 мм. В некоторых случаях поверх мягкой пластмассы дополнительно наносят более твердый слой пластика. На рисунке 3.9, видно, как оптическое волокно пропускается через фильеру узла наложения защитного лакового покрытия, через ультрафиолетовую печь полимеризации лакового покрытия и принимается на вытягивающий механизм, после чего заправочные ролики отводятся в сторону [92].



Рисунок 3.9 – Наложение защитного лакового покрытия на ОВ

Оптическое волокно обрезается ниже заправочных роликов (рисунок 3.10(а)). Затем волокно принимается оператором, выставляется требуемое натяжение оптического волокна. Контроль натяжения осуществляется датчиком натяжения оптического волокна (рисунок 3.10(б)), контактным или бесконтактным. Концентричность защитного покрытия выставляется с помощью механизма позиционирования заготовки по показаниям бесконтактного оптического концентриметра.



а)

б)

Рисунок 3.10 – заправочные ролики и датчик натяжения ОВ

После выхода установки на рабочий режим оптическое волокно перебрасывается на рабочую часть приемной катушки (рисунок 3.11). Непрерывно контролируя диаметр оптического волокна, температуру печи, скорость подачи заготовки, концентричность и диаметр защитного лакового покрытия, натяжение волокна и ряд других параметров, вытягивают оптическое волокно заданного диаметра. Как правило, в этом режиме осуществляется также контроль расхода заготовки и длины изготовленного оптического волокна.



Рисунок 3.11 – Приемная катушка готового оптического волокна

Процесс вытяжки заканчивается после того, как будет израсходована вся заготовка, или в результате обрыва волокна, имевшего место до вытягивающего механизма. В этом случае оборудование установки вытяжки приводится в исходное состояние, предшествовавшее началу работы. Во

время работы установки вытяжки часто возникает ситуация, когда обрыв волокна происходит между вытягивающим механизмом и приемной катушкой. В этом случае процесс вытяжки оптического волокна не прекращается. При таком обрыве приемную катушку заменяют на новую, предварительно снизив скорость вытяжки до заправочной, и затем вновь выводят установку на рабочий режим функционирования [93].

Процесс вытяжки оптического волокна можно условно разбить на последовательность технологических режимов, таких как заправка волокна, разгон установки с заправочной скорости вытяжки до рабочей, вытяжка волокна на рабочей скорости и завершение процесса вытяжки. Процессу вытяжки предшествует расчет ряда технологических параметров: номинального диаметра оптического волокна и рабочей скорости подачи заготовки в высокотемпературную печь [94].

В итоге проведенного эксперимента, путем добавления погрешностей и шумов и параллельном изучении показателей датчиков и измерительных устройств, выявлено следующее:

- отклонение размера диаметра готового ОВ допустимо не больше чем на 2%. В этом случае затухание сигнала и уровень дисперсии будут в пределах нормы;
- точность поддержания температуры в печи, без критического влияния на диаметр вытягиваемого ОВ равна $\pm 5^{\circ}\text{C}$;
- датчик измерения диаметра ОВ должен обеспечивать точность $\pm 0,5$ мкм измерения даже при вибрации ОВ;
- точность нанесения однослойного лакового покрытия ± 1 мкм, для двойного ± 2 мкм.

Исходными данными для расчета являются коэффициент заготовки (отношение диаметра сердечника заготовки к диаметру оболочки), диаметр заготовки и рабочая скорость вытяжки оптического волокна. Полученные в результате расчета значения параметров используются для задания соответствующих параметров вытяжки.

3.2 Структура управляющей системы

Система управления натяжения оптического волокна должна решать задачу стабилизации натяжения стекловода при воздействии возмущений, обусловленных изменениями температуры в высокотемпературной печи, скоростью подачи преформы и прочими возмущающими воздействиями. При этом, в большинстве случаев, указанные возмущающие воздействия носят случайный, стохастический характер. Учет стохастических характеристик возмущающих воздействий позволяет повысить показатели качества регулирования, и в итоге, повышает объем качественно производимого оптического стержня, выпуска годного в эксплуатацию волокна. При использовании традиционных методов проектирования регуляторов, предполагается, что система находится в равновесном состоянии перед появлением возмущающих сигналов. Однако при проектировании управления

с помощью сигма частотно – импульсного модулятора, такие условия не требуются. Это важно для отработки возмущающего стохастического воздействия в нестационарном режиме разгона башни, например, когда, используемый ПИ-регулятор может перейти в режим насыщения. Поэтому был предложен способ построения системы стабилизации температуры в печи с применением сигма частотно – импульсной системы автоматического управления - Σ -ЧИСАУ.

Также, очень важно учитывать, что объект обладает запаздыванием. Оно определяется временем прохождения вытягиваемого стеклоизделия от зоны формирования до датчика, определяющего размеры поперечного сечения. Наличие запаздывания в технологическом процессе приводит к тому, что сигнал на выходе объекта в течение некоторого времени после изменения входного сигнала остается неизменным. Преимущество применения сигма частотно – импульсной системы автоматического управления объектами с запаздыванием, объясняется, прежде всего, возможностью получения высоких показателей качества управления и сравнительно простой технической реализации системы.

Схема системы управления технологическим процессом вытяжки оптического волокна, реализованная при помощи управляющего вычислительного комплекса представлена на рисунке 3.12 [89, с.96, 90, с.54].

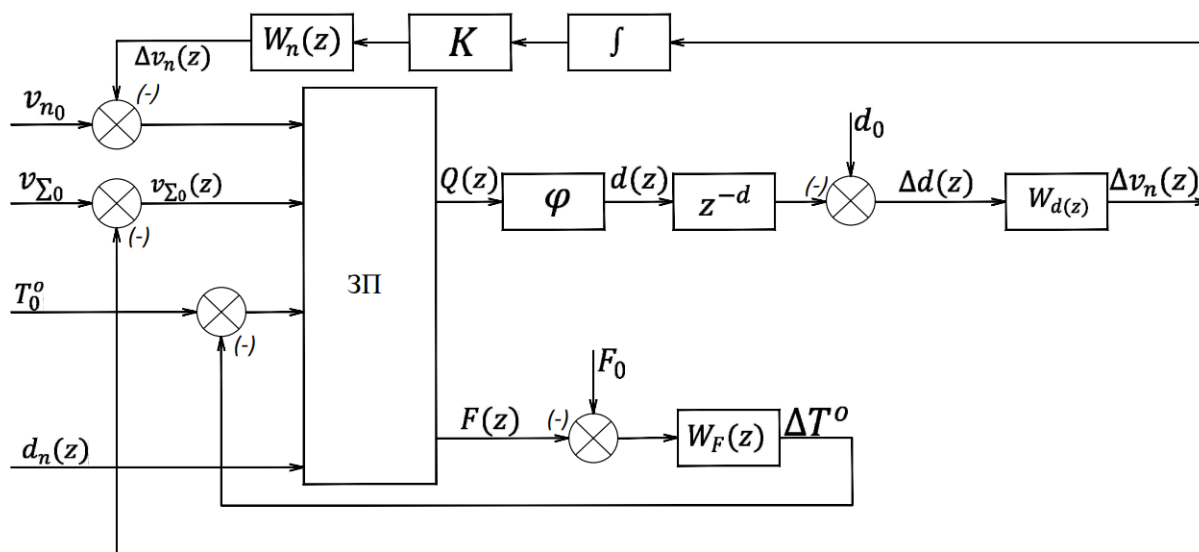


Рисунок 3.12 - Структурная схема системы управления технологическим процессом вытяжки волокна

где, ЗП – зона перетяжки; d – запаздывание, равное времени движения вытягиваемого волокна от луковницы до датчика диаметра; $W_n(z)$ – цифровой регулятор скорости подачи преформы; $W_F(z)$ – цифровой регулятор натяжения вытяжки; $W_d(z)$ – цифровой регулятор диаметра волокна; K – коэффициент пропорциональности между сечениями волокна и преформы; φ – статический

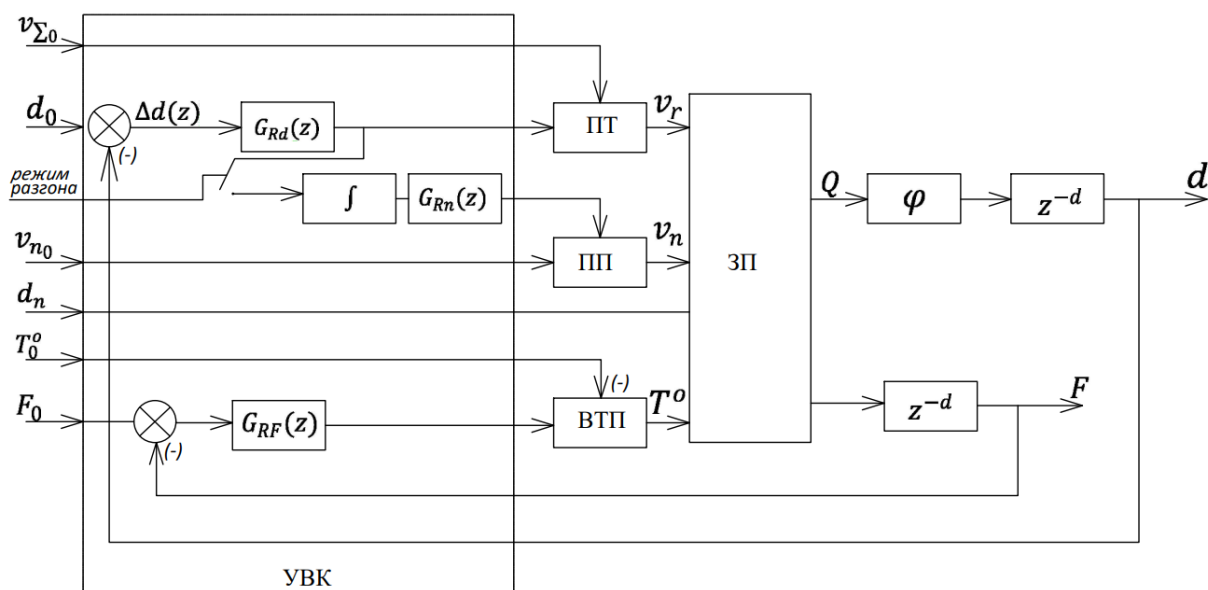
коэффициент, отражающий взаимосвязь диаметра волокна и потока расплава, поступающего из луковицы

Основные функции системы [95]:

- программно-управляемый разгон башни вытяжки (вывод установки вытяжки с заправочной скорости на рабочий режим вытяжки, можно задать для каждой конкретной преформы);
- автоматическое управление высокотемпературной печью с помощью Σ -ЧИМ;
- автоматическое связанное управление скоростью подачи преформы и скоростью вытяжки;
- автоматическое управление диаметром и натяжением вытяжки вытягиваемого волокна;
- адаптация локальных САУ к изменениям параметров преформ и технологических режимных параметров.

На основе цифровых регуляторов построено два контура управления: контур управления натяжением вытяжки F , формирующегося в зоне перетяжки под воздействием температуры $T_{ВТП}$ высокотемпературной графитовой печи ВТП и измеряемого бесконтактным датчиком натяжения; контур управления диаметром волокна d , которое также формируется в зоне перетяжки под воздействием приращений скорости вытяжки Δv_T , вводимых приводом тягового колеса (ПТ) с тиристорным усилителем мощности. Также в системе управления вытяжкой имеется штатный контур управления скорости вытяжки v_T , построенный на основе штатного датчика скорости вытяжки; контур управления скоростью подачи преформы в высокотемпературную печь v_n , задаваемой устройством подачи преформы ПП, в зажиме которого закрепляется верхний конец вытягиваемой преформы.

Управляющий вычислительный комплекс системы УВК формирует задающее воздействие $T_{ВТП}$ для штатного блока управления температурой печи ВТП; задающее воздействие F_0 для системы автоматического управления натяжением вытяжки; задающее воздействие v_{T0} для штатного блока управления приводом тягового колеса башни, задающего скорость вытяжки v_T ; задающее воздействие v_{n0} для штатного привода устройства подачи преформы ПП (рисунок 3.13) [89, с.97].



ЗП - зона перетяжки; ПА - САУ привода тяги; ПП - САУ привода подачи преформы; ВТП - САУ температуры высокотемпературной печи; d - запаздывание, соответствующее времени движения вытягиваемого волокна от зоны перетяжки до датчика диаметра и натяжения; $G_{RF}(z)$ - цифровой регулятор натяжения вытяжки; $G_{Rd}(z)$ - цифровой регулятор диаметра волокна; $G_{Rn}(z)$ - цифровой регулятор коррекции скорости подачи преформы; φ - статическая нелинейная характеристика, отражающая взаимосвязь диаметра волокна и потока расплава, поступающего из зоны перетяжки

Рисунок 3.13 - Схема управления процессом вытяжки волокна

Обычно, при стационарном обслуживании башни вытяжки после её заправки и приёма заправочного конца волокна на приёмную катушку выполняется разгон башни, когда скорость подачи преформы v_n маленькими шагами увеличивается до рабочей скорости. При этом оператор башни, наблюдая за показаниями датчика диаметра волокна, постепенно увеличивает скорость вытяжки, чтобы не допускать ни обрыва волокна, ни излишнего увеличения его диаметра. В разработанной же системе рабочая скорость подачи преформы включается сразу после заправки волокна, что существенно уменьшает время разгона и длину некондиционного, негодного волокна.

3.3 Σ - частотно – импульсная система автоматического управления температурным режимом процесса вытяжки оптического волокна

3.3.1 Математические модели подсистемы НЦУ температурного режима вытяжки оптического волокна

Описание объекта управляемого объекта.

Высокая стоимость экспериментальных исследований, проводимых на технологических объектах, требует оптимизации условий эксперимента при заданных требованиях к точности построенной модели объекта. Особенности

сложных ТП для производства оптических материалов требуют качественной стабилизации всех параметров и наличие базы знаний по всем параметрам [96].

Контур системы автоматического управления диаметром оптического волокна состоит из объекта управления — зоны перетяжки, выходом которой является диаметр вытягиваемого волокна; привода колеса тяги, задающего важный параметр режима технологического процесса вытяжки оптического волокна - скорость тяги; датчика диаметра в обратной связи; цифрового регулятора, обеспечивающего оптимальное управление диаметром вытягиваемого волокна.

Основная цель управления - вытяжка с конкретно задаваемыми скоростью и натяжением вытяжки при поддержании диаметра волокна непосредственно у зоны перетяжки в пределах 125 ± 1 мкм.

Следует отметить, что в модели объекта присутствует звено транспортного запаздывания, где τ - время запаздывания обуславливается временем прохождения вытягиваемого волокна от зоны перетяжки до датчика натяжения.

Система автоматического управления температурным режимом вытяжки оптического волокна должна решать задачу стабилизации напряжения при действии возмущений, которые обусловлены изменением напряжения подаваемое на индукционную высокотемпературную печь, скорости вытяжки оптического волокна, скорости подачи преформы и прочими возмущающими воздействиями. При этом, в большинстве случаев, указанные возмущающие воздействия имеют случайный характер.

Для реализации такой системы управления необходимо ввести блок, обеспечивающий расчет и изменение настроек регулятора в зависимости от изменяющих параметров технологического режима вытяжки оптического волокна.

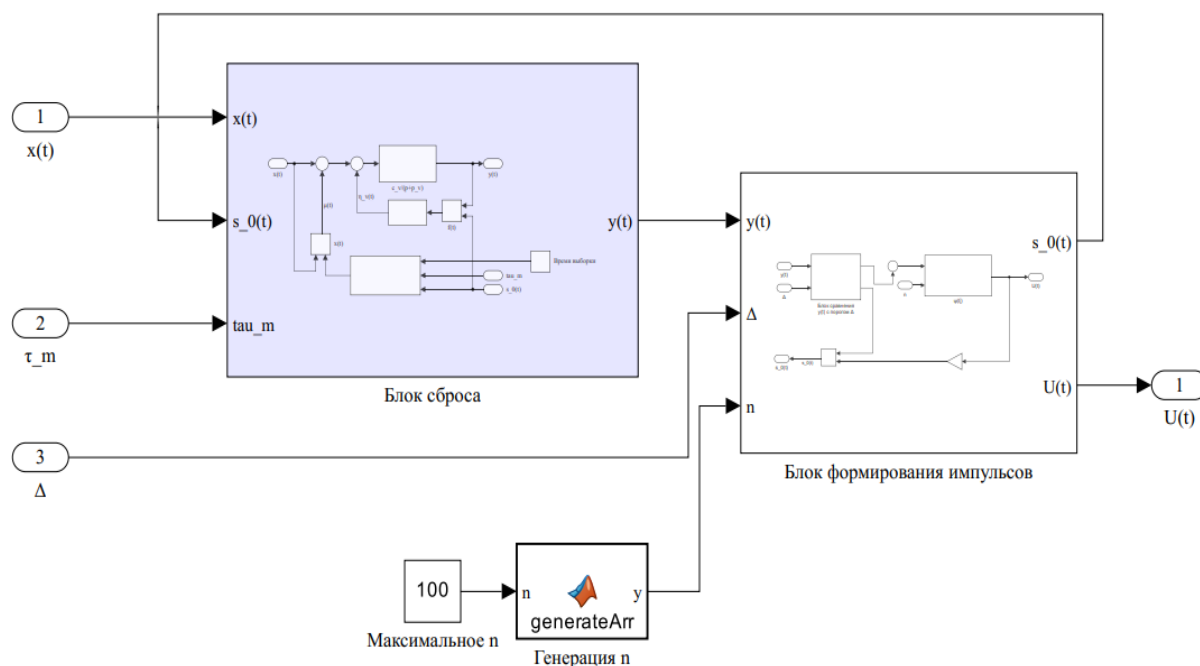


Рисунок 3.14 - Общий вид регулятора Σ - ЧИМ в Simulink

Регулятор разделяется на 2 блока. 1-й блок – блок сброса (БС) и 2-й – блок формирования импульсов (БФИ). Также, в схеме представлен блок, отвечающий за генерацию последовательности целых неотрицательных чисел от 1 до 100, так как выбранное максимальное $n = 100$. Код программы приведен в приложении А. На вход подается максимальное n . Функция проверяет, была ли переменная `currentIndex` уже объявлена или нет, если нет, то она инициализируется значением 1. Постоянная переменная `currentIndex` гарантирует, что функция запоминает свое значение между вызовами. Функция проверяет, есть ли еще элементы для вывода, делает она это путем сравнения текущего индекса `currentIndex` с общим количеством элементов в массиве `numel(n)`. Если для вывода требуется больше элементов (т.е. `currentIndex` меньше или равен количеству элементов в n), функция выводит текущий элемент из массива n с текущим индексом и присваивает этот элемент переменной y . После вывода текущего элемента функция увеличивает значение `currentIndex` на 1, что подготавливает его к следующему вызову `generateArr`, гарантируя, что следующий элемент в массиве будет выведен при последующем вызове. Если все элементы в массиве были обработаны (т.е. `currentIndex` превышает количество элементов в n), функция возвращает 0, чтобы указать, что больше нет элементов для вывода.

Таким образом, эта функция предоставляет способ генерировать элементы из входного массива по одному за раз, сохраняя при этом состояние текущего индекса с помощью постоянной переменной. Как только все элементы сгенерированы, она возвращает 0, чтобы сигнализировать об окончании массива.

Блок сброса. Блок сброса представляет собой блок, в котором генерируются импульсы сброса. Процессы, протекающие в блоке сброса БС тождественны с процессами, протекающим в фильтре Φ модулятора. Здесь осуществляется преобразование процесса ошибки $x(t)$ в непрерывный процесс $y(t)$ на отрезке $t_n + 0 \leq t \leq t_{n+1} - 0$.

Выполнение данного условия осуществляется за счет принудительного удержания выхода $y(t)$ в нулевом состоянии в течение времени запаздывания объекта после выдачи управляющего импульса. В отличие от блока сброса обычного ДЧИМ, в структуре блока сброса системы с запаздыванием присутствует дополнительный блок формирования сигнала $\mu(t)$.

Назначение этого дополнительного блока заключается в формировании сигнала, принудительно удерживающего выход апериодического звена модулятора $y(t)$ в нулевом положении после выдачи импульса управления в течение времени запаздывания объекта.

Блок сброса реализованный в Simulink приведен на рисунке 3.15.

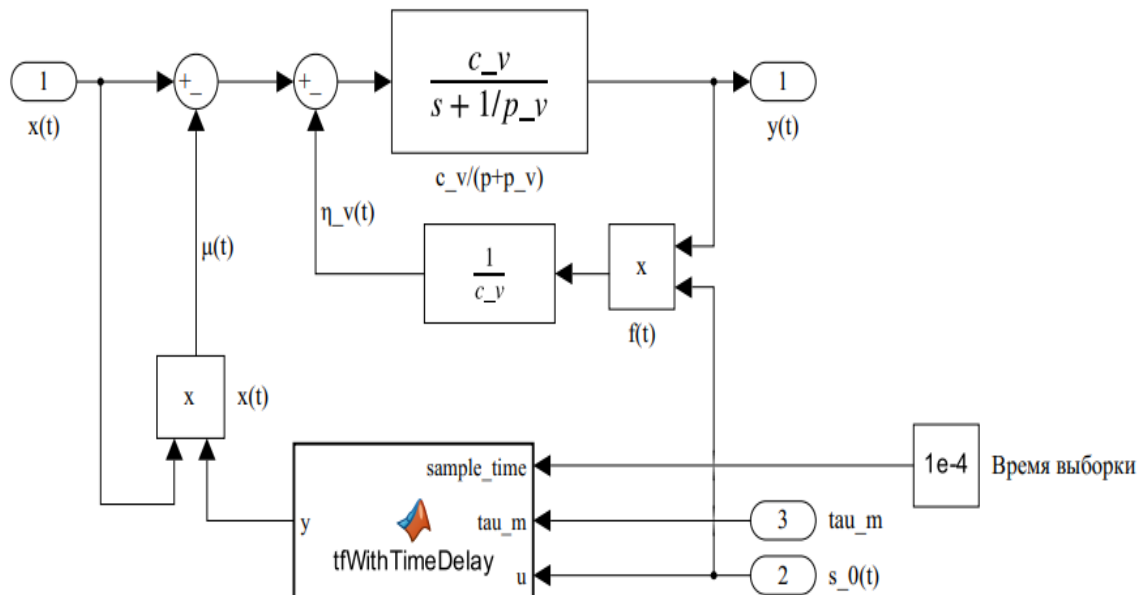


Рисунок 3.15 – Блок сброса реализованный в Simulink

Блок-функция `tfWithTimeDelay` отвечает за получение функции $\frac{1-e^{\tau_m p}}{p}$. На вход она принимает время выборки, время запаздывания τ_m и в качестве аргумента u принимает сигнал $s_0(t)$, который является одним из выходов БФИ. Она вычисляет числитель и знаменатель передаточной функции (ПФ), используя входные величины, затем, с помощью встроенной в Matlab функции `filter`, которая применяет дискретизированную ПФ к входному сигналу (u) с использованием фильтра. Функция фильтра симулирует отклик системы с дискретным временем на входной сигнал на основе предоставленных коэффициентов и входного сигнала. По сути, из переданных аргументов

создает функцию $\frac{1-e^{\tau mp}}{p}$. Фрагмент кода программы разработки блока сброса в Simulink приведен в приложении Б (рисунок Б.1).

Блок формирования импульсов. Блок формирования импульсов, состоящий в свою очередь еще из 2-х частей, одна из которых отвечает за сравнение входного сигнала $y(t)$ с пороговым значением напряжения, подаваемого на высокотемпературную печь и функции $\psi(\xi)$:

$$\psi(\xi) = \begin{cases} n, & 2n - 1 \leq \xi \leq 2n + 1, & n = 1, 2, \dots \\ 0, & -1 \leq \xi \leq 1 \\ -n, & -2n - 1 \leq \xi \leq -2n + 1, & n = -1, -2, \dots \end{cases}$$

В блоке формирования импульсов БФИ осуществляется операция сравнения процесса $y(t)$ с порогом $\pm\Delta$. Структурная схема блока формирования импульсов БФИ, реализованная в среде Simulink, представлена на рисунке 3.16.

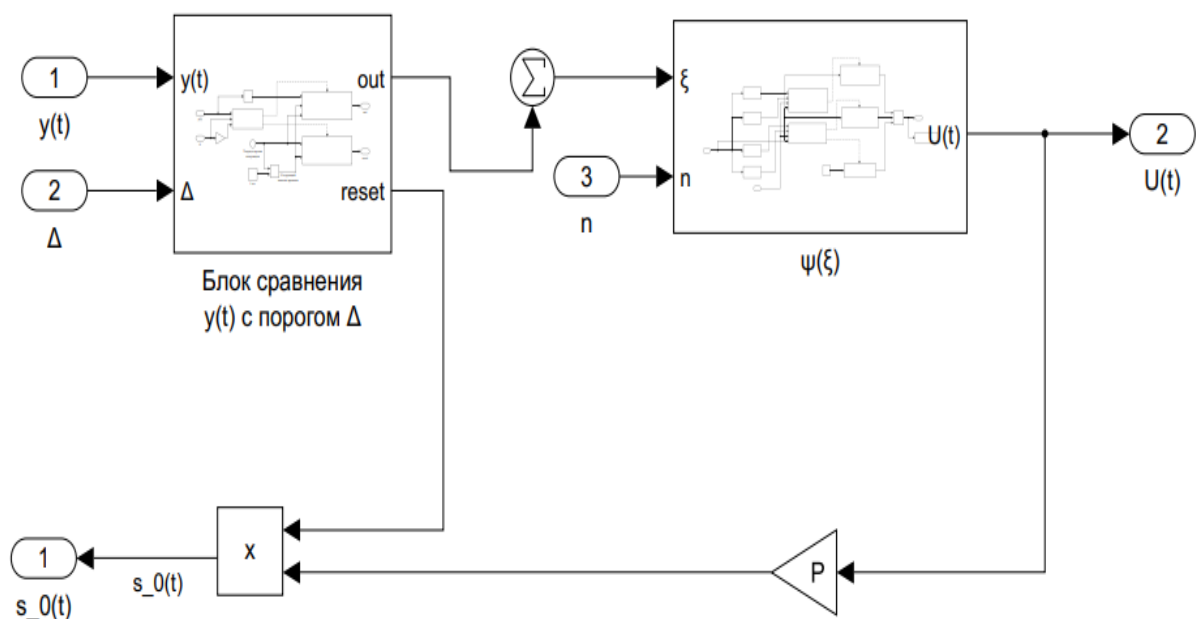


Рисунок 3.16 - Структурная схема блока формирования импульсов БФИ, реализованная в среде Simulink

Далее, на рисунке 3.17, показан блок сравнения процесса $y(t)$ с порогом $\pm\Delta$.

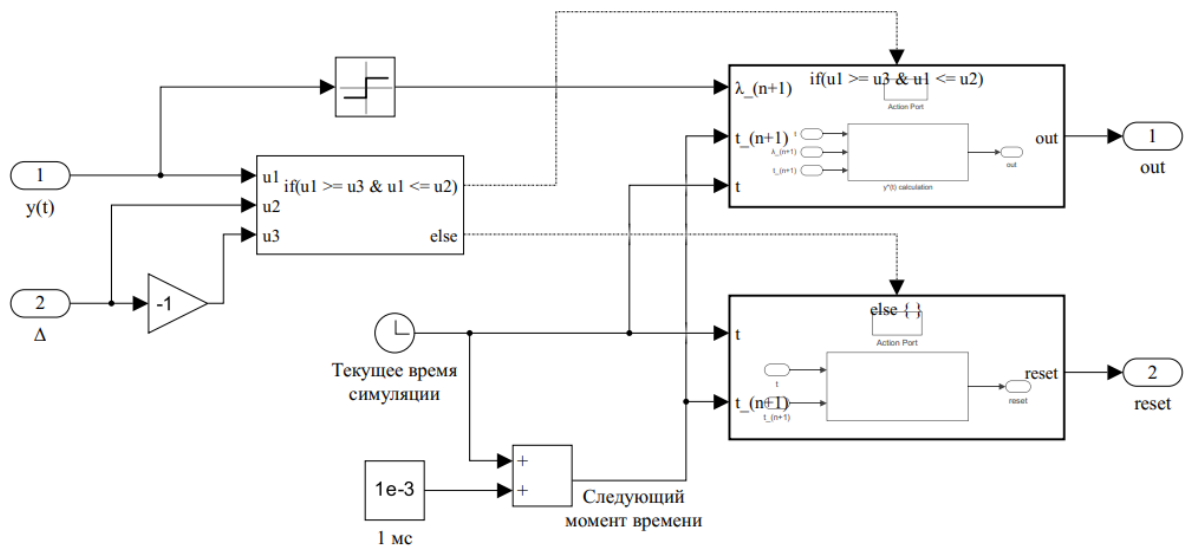


Рисунок 3.17 - Блок сравнения процесса $y(t)$ с порогом $\pm\Delta$

Функция $\psi(\xi)$ полностью реализована на условных операторах и простейших операндах, предоставляемых программным пакетом Matlab. Для объединения выходов всех условных операторов используется блок “Merge”, выход которого затем идет в качестве напряжения, подаваемого на печь башни вытяжки оптического волокна. На рисунке 3.18 приведен блок функции $\psi(\xi)$.

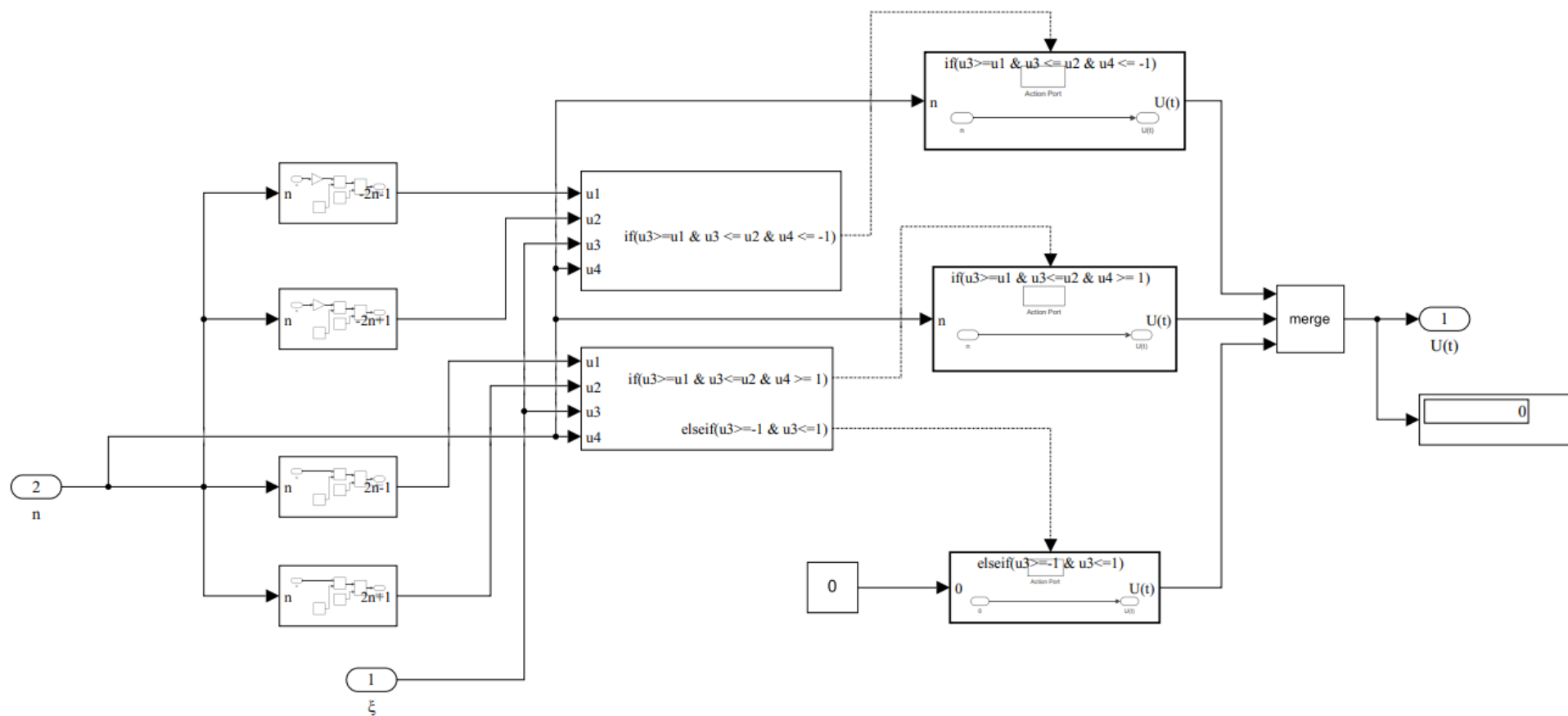


Рисунок 3.18 - блок функции $\psi(\xi)$

На рисунке 3.19 изображены модели получения выражений $(2n + 1)$ и $(-2n - 1)$, другие опущены, в силу аналогичности реализации.

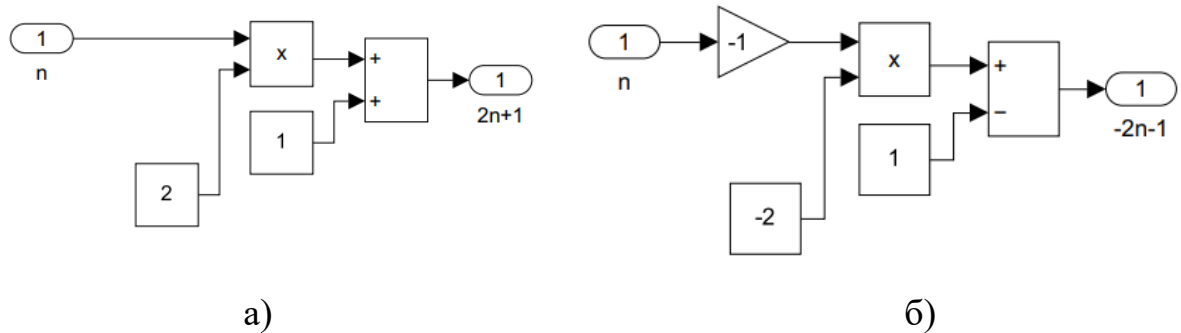


Рисунок 3.19 - Модели получения выражений $(2n + 1)$ (а) и $(-2n - 1)$ (б)

Реализация блока сравнения входного управляющего сигнала $y(t)$ с пороговым значением напряжения. Также, основан на операторах сравнения и математическом описании функций:

$$y^*(t) = \sum_n \lambda_{n+1} \delta(t - t_{n+1}),$$

$$s_0(t) = \delta(t - t_n)$$

В качестве выходов генерируется выходной управляющий сигнал, который будет впоследствии подаваться на вход как переменная ξ , и сигнал сброса, который в дальнейшем будет подаваться на вход БС.

Чтобы получить t_{n+1} , т.е. следующий момент времени, был применен способ добавления в текущему времени симуляции определенного малого количества времени, которое для модели выбрано величиной в 1 мс (рисунок 3.20).

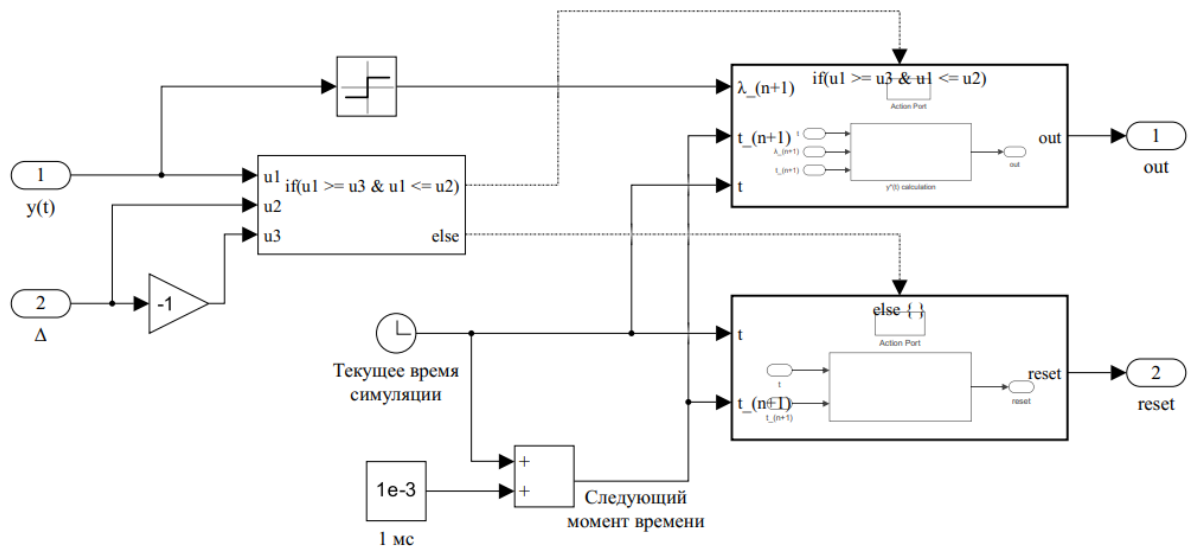


Рисунок 3.20 – Генерирование выходного управляющего сигнала

Блок-функция, генерирующая выходной сигнал, в качестве аргументов принимает время, массив переменных λ_{n+1} , массив, потому что необходимо будет вычислять сумму, из указанной выше формулы вычисления $y^*(t)$ и массив времени t_{n+1} .

Функция инициализирует вектор **y_star** нулями, в котором будет храниться выходной сигнал. Размер этого вектора определяется размером входных данных t . Затем функция выполняет итерацию по элементам **coeff_arr** и **time_arr**, используя цикл $n = 1:\text{length}(\text{coeff_arr})$. Внутри цикла она вычисляет переменную **dirac_res** путем вычитания текущего времени t из экземпляра **time** в **time_arr**. Этот процесс эффективно проверяет, соответствует ли текущее время какому-либо из указанных временных интервалов. Далее функция имитирует дельта-функцию Дирака, используя оператор **if-else**. Если **dirac_res** равен нулю, присваивается бесконечность в переменную **dirac_res**, представляющему импульс в данный момент времени. В противном случае присваивается 0, указывая на отсутствие импульса в данный момент. Затем функция добавляет масштабированную дельта-функцию Дирака $(\text{coeff_arr}(n) * \text{dirac_res})$ к вектору **y_star**. Масштабирование по коэффициенту **_arr(n)** позволяет управлять амплитудой импульсов в определенные моменты времени. Цикл продолжается до следующего элемента в **coeff_arr** и **time_arr**, и процесс повторяется до тех пор, пока не будут обработаны все элементы. Наконец, функция возвращает вектор **y_star**, который представляет выходной сигнал с импульсами, подобными Дираку, в указанные моменты времени, масштабированный соответствующими коэффициентами.

Таким образом, эта функция генерирует выходной сигнал, состоящий из импульсов, подобных функции Дирака, в определенные моменты времени, причем их амплитуды контролируются коэффициентами в **coeff_arr**.

На рисунке 3.21 представлена блок-функция, генерирующая сигнал сброса. Код представлен в приложении Б (рисунок Б.2). Здесь используется тот же метод с встроенной в эту функцию функцией Дирака, как и в предыдущем коде, генерирующем выходной сигнал **out**. Она вычисляет и возвращает сигнал сброса на основе заданного временного вектора и массива временных экземпляров, использует встроенную функцию Дирака для определения значений сигнала сброса в определенные моменты времени.

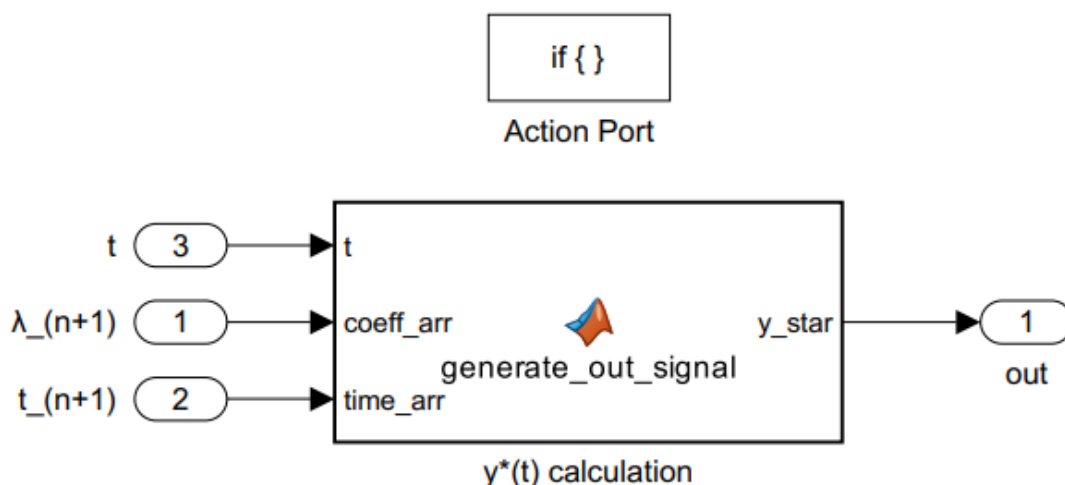


Рисунок 3.21 – Блок функция, генерирующая блок сброса

На рисунке 3.22 представлена Математическая модель Σ -ЧИСАУ температурным режимом вытяжки оптического волокна. Система состоит из нескольких блоков, включая блоки формирования импульсов, сравнения, и другие. Блоки формирования импульсов и сравнения используются для генерации управляющего сигнала и сигнала сброса, соответственно.

Итоговая модель включает в себя математические выражения, описывающие взаимодействие блоков, и позволяет регулировать температурный режим вытяжки оптического волокна с целью поддержания заданных параметров. Модель также учитывает пороговые значения напряжения и временные интервалы для принятия решений.

Система предназначена для стабилизации температуры и других параметров технологического процесса вытяжки оптического волокна при наличии различных возмущающих воздействий.

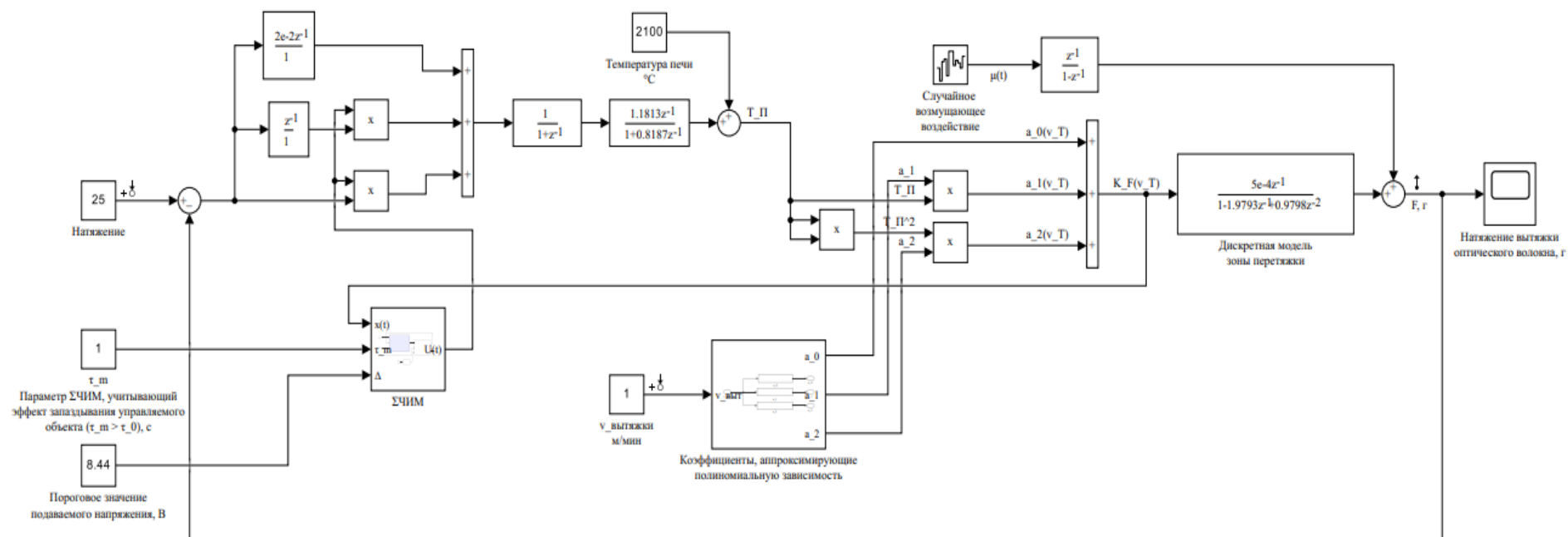


Рисунок 3.22 – Математическая модель Σ -ЧИСАУ температурным режимом вытяжки оптического волокна

На рисунке 3.23 показана полученная переходная характеристика процесса вытяжки оптического волокна.

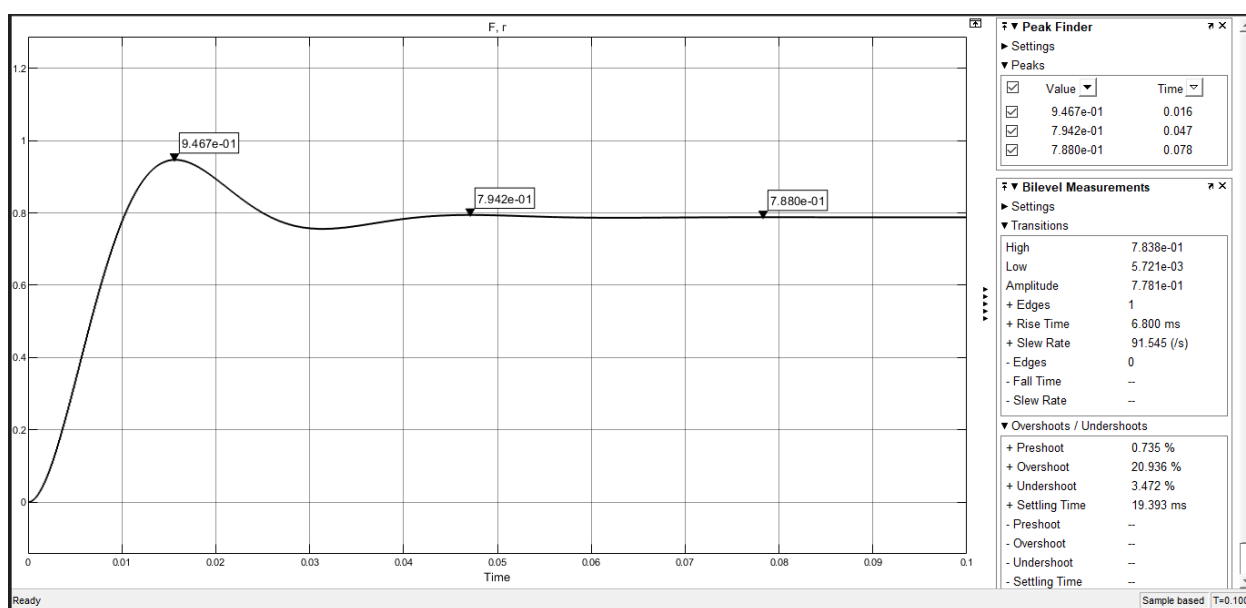


Рисунок 3.23 - переходная характеристика процесса вытяжки оптического волокна

Как видно из рисунка, время нарастания (rise time) – 6.880мс., время установления переходного процесса (settling time) – 18.913мс., что говорит о быстродействии такой САУ.

Экспериментальные исследования процесса вытяжки в различных режимах позволяют определить, что объект имеет степень второго порядка, коэффициент передачи в статике имеет нелинейность, а также объект имеет звено транспортного запаздывания, обусловленное расстоянием от зоны перетяжки до датчика диаметра. Непрерывная передаточная функция зоны перетяжки зависит от длины зоны перетяжки и температуры в высокотемпературной печи.

Для получения всех графиков и передаточных функций использовался встроенный в Matlab инструмент – System Identification Toolbox. Чтобы получить все необходимые графики сходства, графики изменения величин в зависимости от времени и передаточные функции, необходимо объявить две переменных – два массива, представляющие собой вход и выход, содержащих значения. Данный инструмент в работе применяется для получения передаточной функции. Основное окно инструмента приведено на рисунке 3.24:



Рисунок 3.24 - Основное окно встроенного в Matlab инструмента – System Identification Toolbox

На рисунке 3.25 приведены графики напряжения и температуры печи:

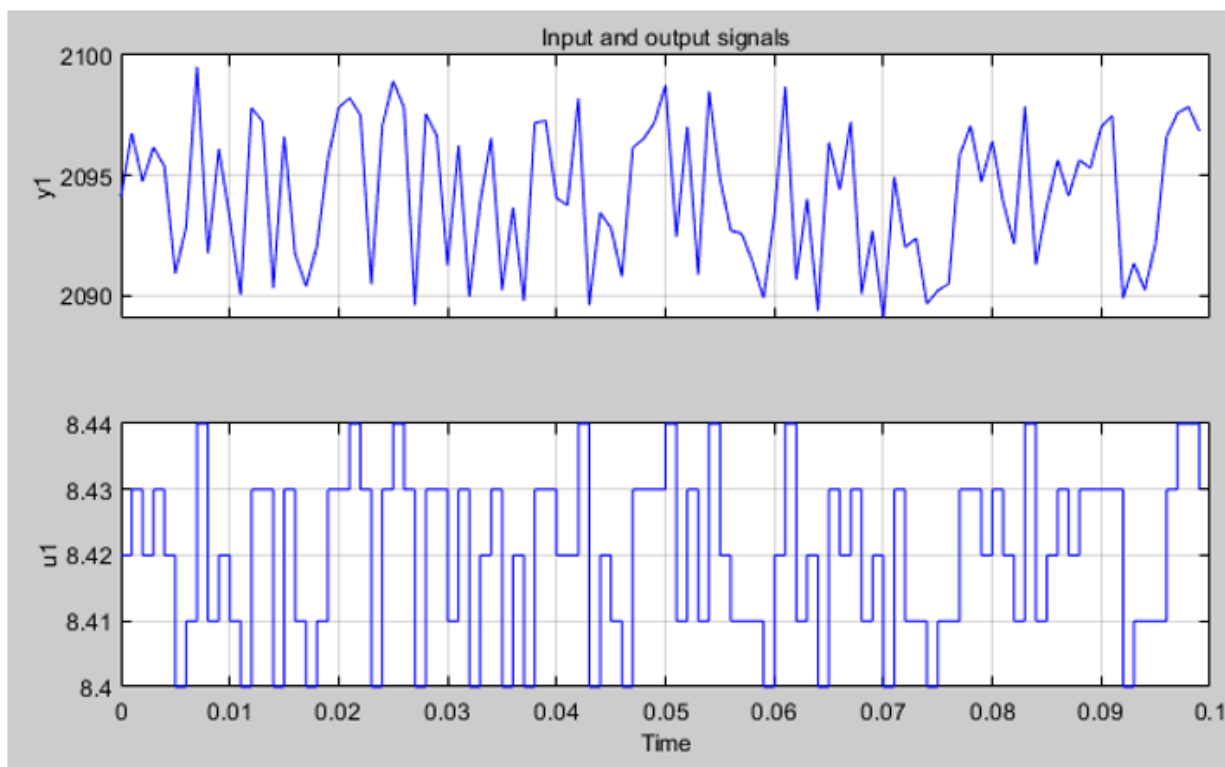


Рисунок 3.25 - Графики напряжения и температуры печи

Подачу заготовки осуществляют с помощью прецизионного винтового приспособления. Центрирование заготовки по оси X и Y происходит автоматически. Дополнительно предусмотрен ручной режим центрирования заготовки. Узел подачи заготовки может иметь дополнительный привод, обеспечивающий вращение заготовки с одновременным ее продольным перемещением. Фрагмент временной последовательности измерения скорости подачи преформы показан на рисунке 3.26.



Рисунок 3.26 - Фрагмент временной последовательности измерения скорости подачи преформы

Часть расплавленного материала, в виде отделившейся от заготовки капли, под действием собственного веса опускается вниз, вытягивая за собой волокно, которое захватывается роликами заправочного механизма. На выходе из печи контроль изменения диаметра волокна осуществляется по показаниям бесконтактного лазерного измерителя диаметра. Также на данном этапе, оптическое волокно должно быть охлаждено до определенного уровня температуры процесса покрытия лаком. Охлаждение происходит естественным путем, а также, применяют специальные камеры охлаждения, через которые проводят вытягиваемое волокно. На рисунке 3.27 приведен фрагмент изменения температуры во временном ряде.



Рисунок 3.27 - Изменение температуры во временном диапазоне

На рисунке 3.28 приведен фрагмент временной последовательности измерения скорости вытяжки оптического волокна.



Рисунок 3.28 - Фрагмент временной последовательности измерения скорости вытяжки оптического волокна

Данные выводы позволяют нам математически описать зависимость диаметра волокна от температуры в высокотемпературной печи в виде непрерывной передаточной функции:

$$W_T(p) = \frac{T_L(p)}{T_{ВТП}(p)} = \frac{e^{-p\tau_o}}{(1 + T_1p)(1 + T_2p)} \quad (3.1)$$

Где, T_1 – постоянная времени, определяемая гидродинамическими свойствами зоны перетяжки; T_2 – постоянная времени, определяющая время нагрева зоны перетяжки; τ_o – время запаздывания, определяемое длиной зоны перетяжки, T_L – температура зоны перетяжки. Данная передаточная функция является частью математической модели, которая позволит синтезировать оптимальное управление процессом вытяжки.

$$\begin{aligned} W_T(p) &= \frac{T_L(p)}{T_{ВТП}(p)} = \\ &= \frac{e^{-p\tau_o}}{(1 + T_1p)(1 + T_2p)} = \frac{e^{-p\tau_o}}{T_1T_2p^2 + (T_1 + T_2)p + 1} \\ &= \frac{1}{T_1T_2(p^2 + \frac{T_1 + T_2}{T_1T_2}p + \frac{1}{T_1T_2})} \\ K_1 &= \frac{1}{T_1T_2}, L_1 = \frac{1}{T_1T_2}, L_2 = \frac{T_1 + T_2}{T_1T_2} \end{aligned}$$

Путем преобразований (3.1) представляется передаточной функцией вида:

$$W_T(p) = \frac{K_1 e^{-p\tau_o}}{p^2 + L_2p + L_1} \quad (3.2)$$

Основные каналы регулирования параметрами температурного режима процесса вытяжки оптического волокна с учетом передаточных функций исполнительного механизма – ИМ и формозадающего элемента – ФЭ с приемлемой точностью передаточная функция (3.1) путем преобразований представляется передаточной функцией вида:

$$W_T(p) = \frac{K_1 e^{-p\tau_o}}{p^2 + L_2p + L_1} = \frac{Z(p)}{U(p)}, \quad (3.3)$$

где $Z(p), U(p)$ – образы (полученные в результате преобразования Лапласа) выходного и входного сигналов соответственно. Преобразуем равенство (3.3):

$$(p^2 + L_2p + L_1)Z(p) = K_1 e^{-p\tau_0} U(p)$$

и применим обратное преобразование Лапласа к обоим частям уравнения:

$$\ddot{z}(t) + L_2 \dot{z}(t) + L_1 z(t) = K_1 \mathcal{L}^{-1}(e^{-p\tau_0} U(p))$$

где K_1 – коэффициент усиления, τ_0 – время запаздывания объекта.

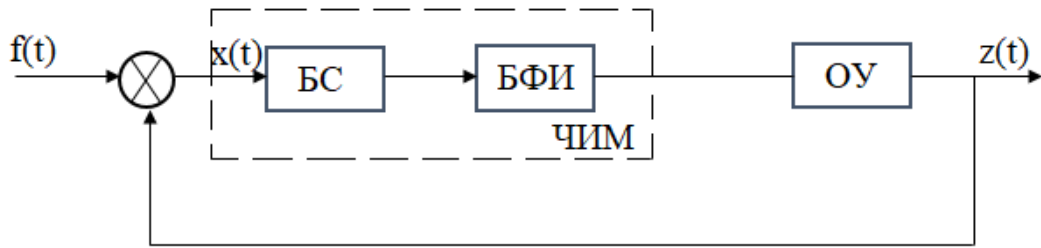


Рисунок 3.29 - Структурная схема контура регулирования управляющих параметров температурного режима процесса вытяжки оптического волокна

В качестве алгоритма управления в данной системе используется алгоритм Σ -ЧИМ, фильтр в данном алгоритме является основным управляющим, задающим управляющий импульс, элементом и описывается уравнением (2.1).

Теперь рассмотрим построение математических моделей подсистемы непосредственного цифрового управления (НЦУ) режимными параметрами процесса вытяжки оптического волокна. Согласно рисунку 3.29, данная система описывается следующими уравнениями:

$$x(t) = -z(t), \quad \dot{z}_1(t) = z_2(t), t = [0, T] \quad (3.4)$$

$$\dot{z}_2(t) = -q_2(t)z_2(t) - q_1z_1(t) + K_1u(t - \tau_L), t = [0, T] \quad (3.5)$$

$$z(t) = f(t), t = [-\tau_0, 0], \mathbf{z}_i^v(0) = C_i, i = \overline{2, l} \quad (3.6)$$

$$\dot{y}_v(t) = -[p_v + s_0(t)]y_v(t) - c_vz_1(t - \tau_m), t = [0, T] \quad (3.7)$$

$$u(t) = \psi(y), y(t) = \frac{1}{\Delta}y_v(t), t = [0, T] \quad (3.8)$$

где c_v – коэффициент усиления фильтра Σ - ЧИМ, $q_1 = L_1, q_2 = L_2$, Δ – пороговое значение импульсного устройства ИУ; τ_m – параметр модификации (время запаздывания) модулятора. $u(t)$, $s_0(t)$ – выходные сигналы блока формирования импульсов, причем:

$$s_0(t) = |\dot{u}(t)|. \quad (3.9)$$

Полученные стохастические дифференциальные уравнения (3.4)-(3.9) дают возможность провести параметрический синтез для исследования асимптотического поведения применяемой Σ - частотно-импульсной системы управления, в процессе стабилизации и управления температурным режимом ВТП башни вытяжки оптического волокна, а также будут использованы для построения модели системы в форме Ито.

Возмущения, действующие на управляемый объект, будем имитировать гауссовскими белыми шумами $\mu_1(t), \mu_2(t)$ с нулевым средним и корреляционной функцией:

$$R = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} \\ r_{21} & r_{22} \end{bmatrix} \quad (3.10)$$

На основании результатов пункта 1.3, объединяя уравнение ПНЧ (1.5) и Σ -ЧИМ (1.16) - (1.20), в соответствии с формулами (3.4) - (3.8) можно получить стохастические дифференциальные уравнения системы в форме Ланжевена:

$$\frac{d}{dt} z^v(t) = Q_0 z^v(t) + D_0[z^v] \vec{\mu}(t) + \vec{b}_0 u(t), t = [0, T] \quad (3.11)$$

$$z(t) = f(t), t = [-\tau_0, 0], z_i^v(0) = C_i, i = \overline{2, l}$$

$$u(t) = \psi(y(t)), \quad y(t) = \frac{1}{\Delta} y_v(t) \quad (3.12)$$

$$\dot{y}_v(t) = -[p_v + s_0(t)] y_v(t) - c_v z_1(t - \tau_m) \quad (3.13)$$

где

$$Q_0 = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ -q_1 & -q_2 \end{bmatrix}, \quad D_0[z^v] = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ -z_1 & -z_2 \end{bmatrix} \quad (3.14)$$

$$\vec{q}_0 = [1 \quad 0]^T, b_0 = [0 \quad K_1]^T, \vec{\mu}(t) = [\mu_1(t), \mu_2(t)]^T.$$

Получим стохастические дифференциальные уравнения в форме Ито системы с Σ - ЧИСАУ, рассмотренной выше:

Согласно (2.40):

$$\mu_1(t) = \delta_{11}\dot{w}_1(t) + \delta_{12}\dot{w}_2(t)$$

$$\mu_2(t) = \delta_{21}\dot{w}_1(t) + \delta_{22}\dot{w}_2(t)$$

Причем:

$$\begin{bmatrix} \delta_{11} & \delta_{12} \\ \delta_{21} & \delta_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta_{11} & \delta_{21} \\ \delta_{12} & \delta_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} \\ r_{21} & r_{22} \end{bmatrix}$$

Тогда:

$$D_1[\mathbf{z}^v] = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ -(\delta_{11}z_1 + \delta_{21}z_2) & -(\delta_{12}z_1 + \delta_{22}z_2) \end{bmatrix}.$$

Просуммировав полученный результат в уравнении Ланжевена и заменив белые шумы винеровским процессом, получим следующие стохастические дифференциальные уравнения в форме Ито, отвечающие физической сущности рассматриваемой системы:

$$dz_1(t) = z_2(t)dt \quad (3.15)$$

$$dz_2(t) = \left\{ \left[-q_1 + \frac{1}{2}(\delta_{21}\delta_{11} + \delta_{22}\delta_{12}) \right] z_1 + \left[-q_2 + \frac{1}{2}(\delta_{21}^2 + \delta_{22}^2) \right] z_2 \right\} dt + (-\delta_{11}z_1 - \delta_{12}z_2)dw_1(t) + (\delta_{21}z_1 - \delta_{22}z_2)dw_2(t) + K_1 u(t)dt \quad (3.16)$$

$$u(t) = \psi(y), y(t) = \frac{1}{\Delta} y_v(t) \quad (3.17)$$

$$dy_v(t) = \left[\left(-p_v + \frac{1}{2}\sigma_0^2 \right) y_v - c_v z_1(t - \tau_m) \right] dt - \sigma_0 y_v(t) d\eta(t). \quad (3.18)$$

Рассмотрим стохастическую систему автоматического управления с Σ -ЧИМ и линейной приведенной непрерывной частью (рисунок 3.16). Приведенная непрерывная часть ПНЧ описывается уравнением:

$$\ddot{z}(t) + [3 + \mu_2(t)]\dot{z}(t) + [2 + \mu_1(t)]z(t) = 10y^*(t) \quad (3.19)$$

Σ - ЧИМ представляется соотношениями:

$$y(t_{n+1} - 0) = 0,1 \int_{t_{n+1}}^{t_{n+1}-0} \exp[-(t_{n+1} - \tau)] x(\tau - \tau_m) d\tau = \lambda_{n+1} \quad (3.20)$$

$$\lambda_{n+1} = \text{sign } y(t_{n+1} - 0)$$

Матрица интенсивности шумов $\mu_1(t)$, $\mu_2(t)$ имеет вид:

$$R = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} \\ r_{21} & r_{22} \end{bmatrix}$$

В данном примере, для параметрического синтеза описанной системы, для следующих матриц интенсивностей шумов R равна:

$$R_1 = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad R_2 = \begin{bmatrix} 0,01 & 0,02 \\ 0,02 & 0,04 \end{bmatrix},$$

$$R_3 = \begin{bmatrix} 0,05 & 0,09 \\ 0,09 & 0,17 \end{bmatrix}, \quad R_4 = \begin{bmatrix} 0,20 & 0,36 \\ 0,36 & 0,68 \end{bmatrix}$$

3.3.2 Параметрический синтез Σ -частотно-импульсной системы управления температурным режимом процесса вытяжки оптического волокна

Параметрический синтез системы в допустимой области функционирования проводится по критерию качества на основе стохастической модели Ито (3.15) – (3.18).

В этом случае задача синтеза сводится к выбору параметров:

$$\vec{c} = \left[\Delta, \quad c_v, \quad \frac{1}{p_v} \right]$$

из условия минимальности дисперсии:

$$Q = M\{[x(t) - m_x]^2\} \rightarrow \min \quad (3.21)$$

Ограничениями задачи (3.21) являются следующие соотношения - это, уравнения системы в форме стохастических дифференциальных уравнений Ито (2.49) – (2.51), отвечающие физической сущности рассматриваемой системы и допустимая область функционирования:

$$\Delta_{\min} \leq \Delta \leq \Delta_{\max}$$

$$c_{v \min} \leq c_v \leq c_{v \max}$$

$$\frac{1}{p_{v \max}} \leq \frac{1}{p_v} \leq \frac{1}{p_{v \min}}$$

где $\vec{c} = \left[\Delta, c_v, \frac{1}{p_v} \right]$ – вектор настроечных параметров Σ -ЧИСАУ, применяемого для управления объектами с запаздыванием.

Результаты вычислительного эксперимента по определению оптимальных значений $\vec{c}$ Σ -ЧИСАУ температурным режимом вытяжки оптического волокна:

$$c_v = 5,38 \text{ (В} \cdot \text{мин}^{-1} \cdot \text{мкм}^{-1}\text{)}, \quad \frac{1}{p_v} = 0,42 \text{ (мин)}, \quad \Delta = 8,44 \text{ (В)}$$

поскольку p_v – величина, обратная постоянной времени, характеризующая инерционность звена, Δ имеет те же единицы измерения, что и u , то есть напряжение, подаваемое на катушку печи.

Разработанная сигма частотно – импульсная система автоматического управления объектами с запаздыванием, а также представленные математические и имитационная модель в среде Simulink могут послужить основой для создания и внедрения автоматизированных систем управления различными производственными, технологическими объектами с запаздыванием. При разработке системы, модели и методы, предложенные в работе, адаптированы к реальным условиям функционирования некоторых технологических процессов.

Возможна успешная реализация в технологических процессах производства цемента и черного свинца, как в объектах, обладающих запаздыванием и наличием случайных возмущений. В работе [97] описывается технологический процесс обжига клинкера, который отличается сложностью химических превращений, случайными изменениями в широких пределах качественного состава входного материального потока, числом характерных зон печи, температурным и другими режимами. Вследствие большой емкости печи, обуславливающей при малых скоростях материальных потоков соответственно большие запаздывания по каналам регулирующих воздействия, наличия обратных связей между газовыми и материальными потоками, большего числа неконтролируемых внешних и внутренних возмущений. Наибольшее повышение эффективности такого производства возможно при разработке такой автоматизированной системы управления, которая будет учитывать воздействие этих факторов.

Основная концепция и научная новизна работы имеет прикладной аспект для повышения качества отливки трехмерных металлических автомобильных деталей на 3D принтерах. Данное направление исследований необходимо развивать с учетом потребностей растущей автомобильной

промышленности Казахстана. 3D печать металлических автомотозапчастей и повышение их качества является приоритетным направлением применений технологий цифрового двойника в Industrial 4.0.

Не малое количество технологических агрегатов в реальных производственных условиях находятся под воздействием возмущающих факторов, являющихся случайными функциями времени. Укажем, например, такой распространенный технологический агрегат, как трубная шаровая мельница.

Выходная величина, характеризующая работу мельницы, толщина помола материала. Она определяется при выходе материала из мельницы и имеет транспортное запаздывание относительно регулирующего воздействия - подачи сырья в мельницу. Это запаздывание обусловлено перемещением материала в объекте и составляет несколько десятков минут. Основные возмущения, поступающие с сырьем, это: изменения крупности, твердости и других физических свойств материала, так же, как и изменения расхода, проходящего через питатель мельницы сырья, являются случайными функциями времени и в реальных заводских условиях изменения этих возмущений во времени не могут быть предсказаны.

Другой аналогичный распространенный объект - топка котла или печи. Выходная величина, характеризующая процессы в топке - содержание кислорода в дымовых газах, имеет транспортное запаздывание порядка десятков секунд. Значительная часть этого запаздывания сосредоточена в датчике и определяется временем прохождения отбираемого для анализа газа через газоотборное устройство газоанализатора. Основные возмущающие факторы - изменения физических и химических свойств топлива, его состава, расхода топлива и воздуха во времени - носят чисто случайный характер [98].

Аналогичные процессу, описанному в работе, литейные процессы также отличаются многооперационностью, разноопреационностью и многообразием влияющих на них факторов. Для них характерно большое количество возмущающих воздействий. О результатах литейного процесса окончательно судят по качеству полученных отливок, а время между выполнением какой – либо операции и оценкой ее результатов по качеству отливки существенно определяет динамику литейного процесса как объекта управления.

В технологическом процессе и системе управления процессом имеются звенья запаздывания по времени. В линии прямой связи (т.е. непосредственно в технологическом процессе) эти запаздывания определяются временем выполнения самого технологического процесса. В линии обратной связи это время запаздывания информации о качестве отливок. Оно связано с частотой контроля качества отливок и временем обработки полученной информации [99].

Описанные выше технологические процессы, имеют широкое распространение в производственных процессах и отечественной промышленности Республики Казахстан. Во всех, приведенных, к примеру процессах, возможно использование разработанной системы автоматического

управления, отличительной особенностью которой является управление объектами с запаздыванием и воздействие на объект управления случайных возмущений. Использование стохастической прикладной модели сигма частотно – импульсной системы с запаздыванием является важным направлением разработки адаптивных систем управления, которые классифицируются как переходные модели к недетерминированным методам учета по возмущению и отклонению АСУ.

3.4 Устройство для измерения скорости протяжки диэлектрических нитей

При современной технологии производства тонких нитей, актуальность имеет разработка метода для измерения линейных параметров скорости протяжки движущихся диэлектрических нитей в виде тонких проволок сопротивления со стеклянной изоляцией, тонких эмаль проводов и нитей оптического волокна. В этом случае, например, одной из основных стадий процесса изготовления оптического волокна (ОВ) является вытягивание его на установке вытяжки. Установлено, что колебание диаметра по длине волоконного стержня, во многом, определяют оптико – физические свойства ОВ (оптические потери при распространении сигнала, полосу пропускания, дисперсию и т.д.), а разброс скоростей вытяжки ОВ также существенно влияют на его прочность и оптико – физические свойства [100].

Большое разнообразие форм электродов и их расположения относительно друг от друга, а также возможность протекания коронного разряда в атмосферном воздухе создали предпосылки для разработки целого ряда новых методов и коронноразрядных преобразователей, предназначенных для измерения параметров микропроводов и линейных размеров различных объектов [101].

Основной целью разработки устройства для измерения скорости протяжки диэлектрических нитей является обеспечение высокой точности и надежности измерения при независимости показаний результатов от изменения электрических характеристик разрядных промежутков, состояния атмосферного воздуха и значений геометрических параметров диэлектрических нитей [102].

Ранее был разработан способ для измерения скорости протяжки микропровода [103], который, содержит основной кольцевой электрод, охватывающий контролируемую проволоку, два дополнительных кольцевых электрода, идентичных по форме и размерам и расположенных соосно с двух сторон основного электрода, и балансную схему с выходным прибором. В устройстве по этому способу из-за возникновения электрогазодинамического эффекта вблизи поверхности движущейся проволоки возникают процессы уноса и вноса объемных зарядов в разрядные зоны дополнительных электродов, что, в конечном итоге, позволяет судить о значениях скорости протяжки проволоки. В данном устройстве отмечено, что применение балансной схемы измерения существенно снижает погрешности измерения

скорости протяжки проволоки при изменениях электрических характеристик разрядов и геометрических параметров коронирующей проволоки. Между тем, из-за разного расположения дополнительных электродов, которые по сути являются измерительными, изменения температуры и давления окружающего атмосферного воздуха могут оказать влияние в значительной степени на точность измерения. Кроме того, в предложенном устройстве, также не учтено влияние отличия краевых эффектов у двух дополнительных электродов. К тому же, из-за невозможности замены коронирующей микропроволоки на диэлектрическую нить, это устройство не пригодно для наших целей.

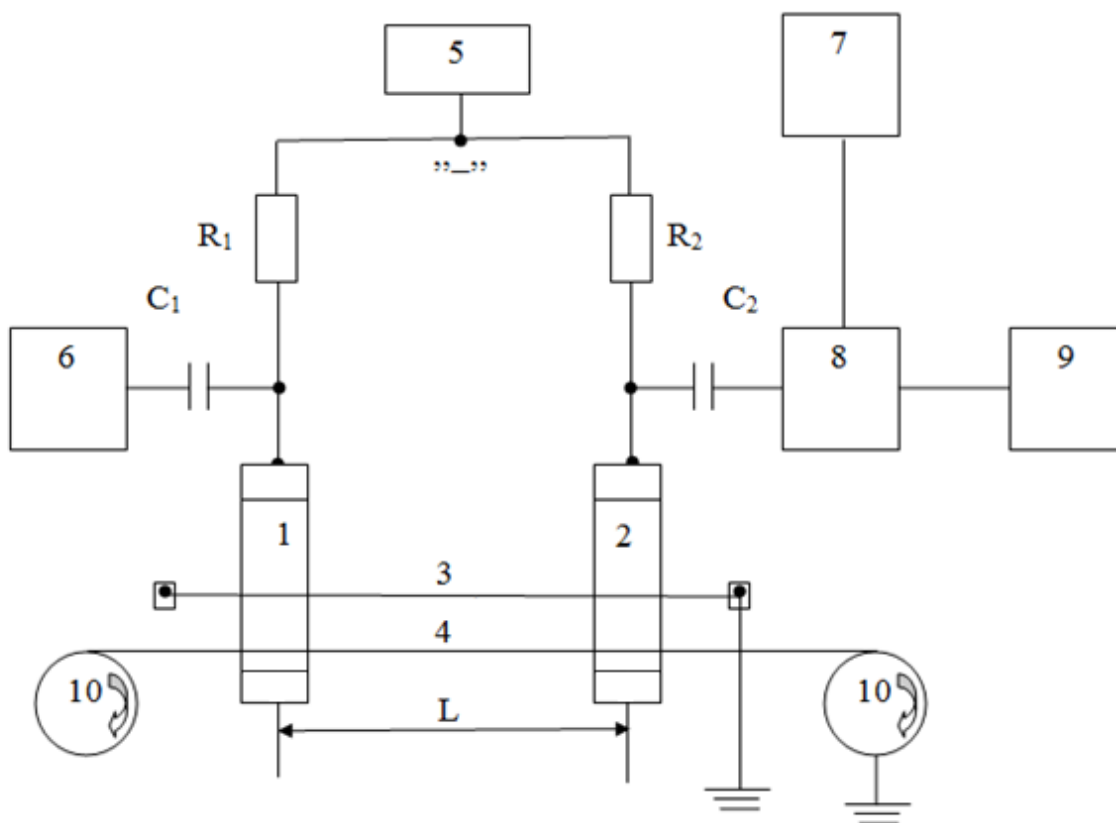
В основу измерения скорости протяжки диэлектрических нитей положены принципы измерения скоростей методом меток, которые заранее наносятся на движущиеся объекты, а затем определяют скорости их прохождения с помощью различных измерительных приборов [104]. Однако возникают существенные трудности технического характера с нанесением меток при измерении скорости движения микрообъектов, таких как диэлектрическая нить или микропроволока с эмалевым покрытием (10 – 100 микрон) [105].

В разработанном устройстве для нанесения меток на диэлектрическую нить используется внешняя область коронного разряда, возникающего при подаче достаточно высокого напряжения между коронирующей проволокой и внешним плоскопараллельным электродом. Во внешней области коронного разряда обычно присутствуют однополярные ионы, которые заряжают поверхность диэлектрической нити. Одним из наилучших путей получения четкой картины электронных меток на поверхности диэлектрической нити является подача к разрядной камере дополнительно тактовых импульсов достаточной величины с определенной длительностью и частотой. При этом, диэлектрическая нить располагается параллельно коронирующей проволоке и по середине разрядного промежутка между проволокой и плоским электродом. Затем, диэлектрическая нить с электронными метками проходит через второй измерительный электрод, расположенного в некотором удалении от первого электрода. При прохождении нити через измерительный электрод возникают процессы разрядки нити и соответственно, на нагрузке электрода появляются электрические сигналы с частотой тактовых импульсов. Теперь, выбирая длительность опорных сигналов, иными словами, выбирая время счета тактовых импульсов за это время, по количеству импульсов определяют скорость протяжки нити [106].

Для повышения точности измерения и надежности результатов, а также повышения помехоустойчивости измерения к изменениям характеристик коронного разряда и геометрических параметров измеряемой диэлектрической нити – в обоих электродах используется положительный коронный разряд, его начальный участок вольт - амперной характеристики, когда коронный разряд находится в «ждущем» режиме или течет малый разрядный ток (не более 1мкА). Выбор положительного коронного разряда связан с тем, что он отличается высокой стабильностью характеристики и в

нем отсутствуют электронные лавинные процессы, образующие случайные импульсы Тричеля [107]. В качестве тактовых импульсов для нанесения электронных меток на нить выбраны прямоугольные импульсы в виде формы «меандр», которые при положительной полуволне закрывают разрядный промежуток, а при другой полуволне дополнительно создаются импульсные разряды, которые заряжают движущуюся диэлектрическую нить.

На рисунке 3.30 представлена функциональная схема устройства для измерения скорости протяжки диэлектрической нити в процессе ее изготовления. Устройство содержит два идентичных электрода плоскопараллельной формы 1,2, показанных на рисунке 3.31(а), которые соосно охватывают коронирующую проволоку 3 и расположены в некотором отдалении друг от друга. Контролируемая диэлектрическая нить 4 проходит через разрядную зону коронного разряда. В нашем случае используется источник высоковольтного питания 5 с отрицательной полярностью на выходе, что позволяет получить положительный коронный разряд в разрядных промежутках между электродами 1 и 2 и проволокой 3. Стабилизация характеристик коронного разряда в двух разрядных камерах 1 и 2 и создание условий «ждущего» режима достигаются с помощью высокоомных сопротивлений R1 и R2. Кроме того, устройство содержит два генератора импульсных сигналов: один высокочастотный генератор тактовых импульсов 6, а другой низкочастотный – опорных импульсов 7. Подача и съем импульсных сигналов на высоковольтные точки схемы осуществляются высоковольтными конденсаторами C1 и C2. Выходной сигнал с электрода 2 поступает в электронный блок 8 и после преобразования передается на счетчик импульсов 9. Электронный блок 8, приведенный на рисунке 3.31(б), состоит из формирователя импульсов 1 и электронного ключа 2. Расстояние между 1 и 2 обозначено L [108].

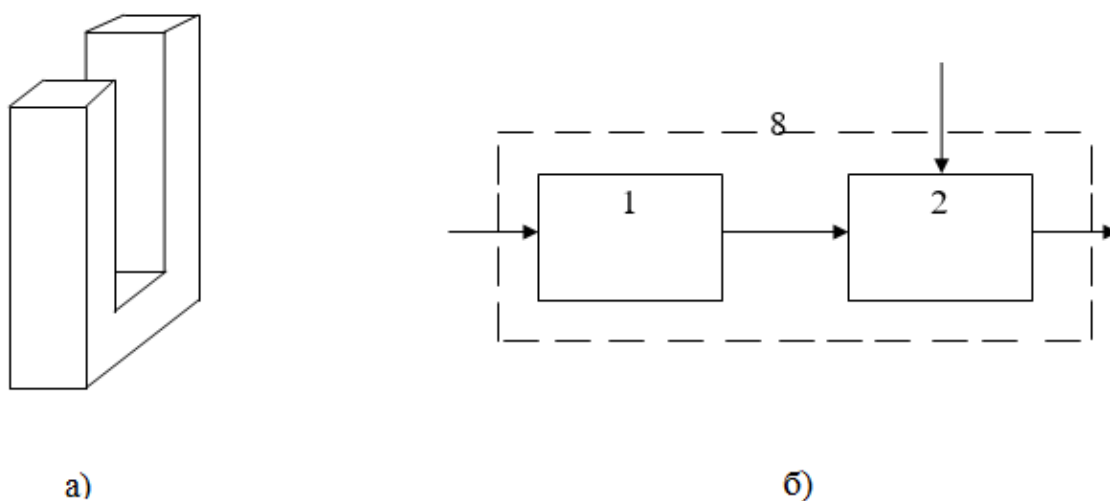


1,2 - два идентичных электрода плоскопараллельной формы, 3 - коронирующая проволока, 4 - диэлектрическая нить, 5 - источник питания, 6 - высокочастотный генератор тактовых импульсов, 7 - низкочастотный генератор опорных импульсов, 8 - электронный блок, 9 - счетчик импульсов, 10 - перемоточная установка

Рисунок 3.30 – Функциональная схема устройства для измерения скорости протяжки диэлектрической нити

При подаче достаточно высокого напряжения отрицательной полярности на плоскопараллельные электроды 1 и 2 создаются условия для возникновения положительного коронного разряда между ними и проволокой 3. При наличии двух высокоомных сопротивлений R_1 и R_2 и регулируемого значения высокого напряжения 5 устанавливается «ждущий» режим в двух разрядных промежутках 1 и 2. Затем, на электрод 1 от генератора тактовых импульсов 6 через C_1 подаются прямоугольные импульсы в виде «меандр» и при отрицательной полуволне протекает через разрядный промежуток импульсный коронный разряд, что обеспечивает зарядку диэлектрической нити 4, находящейся в зоне разряда. При «ждущем» режиме разряда рабочая точка находится на начальном участке вольтамперной характеристики коронного разряда и поэтому, положительная полуволна тактовых импульсов закрывает разрядный промежуток, что позволяет произвести очистку зоны разряда и поверхности диэлектрической нити от посторонних заряженных

частиц. При протяжке диэлектрическая нить с электронными метками поступает во второй измерительный электрод 2, где разряжается и при этом на нагрузке электрода R2 появляются импульсные сигналы с частотой тактовых импульсов. Эти импульсы через C2 подаются на вход электронного блока 8, состоящего из формирователя импульсов 1 и электронного ключа 2 (рисунок 3.18(б)). Они в формирователе импульсов 1 преобразуются в удобную форму для счетчика импульсов и поступают в электронный ключ 2. Электронный ключ 2 пропускает их только при подаче на него опорного сигнала от генератора 7 и за время равное длительности опорного сигнала. Счетчик импульсов 9 показывает количество импульсов, прошедших через электронный ключ, которое будет пропорционально скорости протяжки нити. Таким образом появляется возможность градуировку счетчика импульсов по заранее известным значениям скорости протяжки диэлектрической нити, измеренными в стационарных условиях контрольными приборами с более высокой точностью измерения.



а) – форма электродов, б) – электронный блок, где 1 – формирователь импульсов, 2 – электронный ключ

Рисунок 3.31 – форма электродов и электронный блок

В связи с тем, что метод электронных меток обычно работает по алгоритму «0 или 1», что означает сигнал есть или нет, то в принципе, возможно исключить влияние на точность измерения изменений ряда параметров измерительного устройства, например, изменения электрических характеристик коронного разряда, состояния окружающего атмосферного воздуха и геометрических размеров контролируемой нити. Если таким путем методическая погрешность измерения сводится к минимуму, то оставшая часть погрешности измерения будет определяться инструментальной погрешностью измерительных приборов, используемых в устройстве. Несколько облегчает задачу то, что точности измерения применяемой

стандартной аппаратуры заранее известны или имеется возможность их выбора.

Устройство имеет следующие параметры: плоскопараллельные электроды имеют ширину 1,5 см, рабочая длина - 1 см, зазор между ними $L=2$ см, диаметр коронирующей проволоки из вольфрама – 100 микрон. Контролируемая нить расположена на расстоянии 0,3 см. от поверхности внешнего электрода. Балластные сопротивления $R1$ и $R2$ равнялись 1 МОм, конденсаторы $C1$ и $C2$ - 1 мкФ. Для питания разрядных камер использован высоковольтный источник напряжения типа ВС-22. Источниками импульсных сигналов являлись генераторы Г5 - 88 ($f = 1$ кГц, $U = 100$ В) и Г5-72 ($f = 1$ Гц, $U = 10$ В).

Опытные испытания устройства были выполнены на перемоточной установке с пределом изменения скорости перемотки до 3м/мин. В качестве диэлектрических нитей опробованы медные проволоки с эмалевым покрытием в диапазоне диаметров 20 - 100 микрон. Опытные измерения показали, что изменения давления атмосферного воздуха в пределах ± 20 кПА и диаметра проволоки на ± 10 микрон не оказывают влияния на точность измерения скорости протяжки диэлектрической нити, которая составила порядка 1 - 2% от измеряемой скорости. Полученная точность измерения скорости протяжки диэлектрической нити соответствует градуировочной кривой, построенной по значениям скоростей протяжки в диапазоне 1 - 3м/мин, измеренных в стационарных условиях [109].

В данном разделе описано разработанное устройство для бесконтактного и непрерывного измерения скорости протяжки диэлектрических нитей оптического волокна, применение которых обеспечит автоматический контроль и управление технологическим процессом изготовления ОВ.

3.5 Разработка устройства для измерения диаметра движущихся диэлектрических нитей

Тонкая и сверхтонкая проволока (5 - 100 микрон) из различных металлов и сплавов (вольфрам, молибден, нихром, медь и др.) широко применяется в электровакуумной и радиотехнической промышленности. Однородность параметров и надежность работы электро- и радиоламп в значительной степени зависят от качества проволоки, электрические характеристики которой при постоянстве состава металла определяются, в основном, геометрическими размерами ее сечения. Поэтому разработка новых методов и устройств для точного контроля размеров микропроволоки в условиях производства имеет большое практическое значение. В большинстве случаев микропроволоки из металлов и сплавов изготавливаются с помощью горячего или холодного волочения проволоки через алмазные фильеры [110].

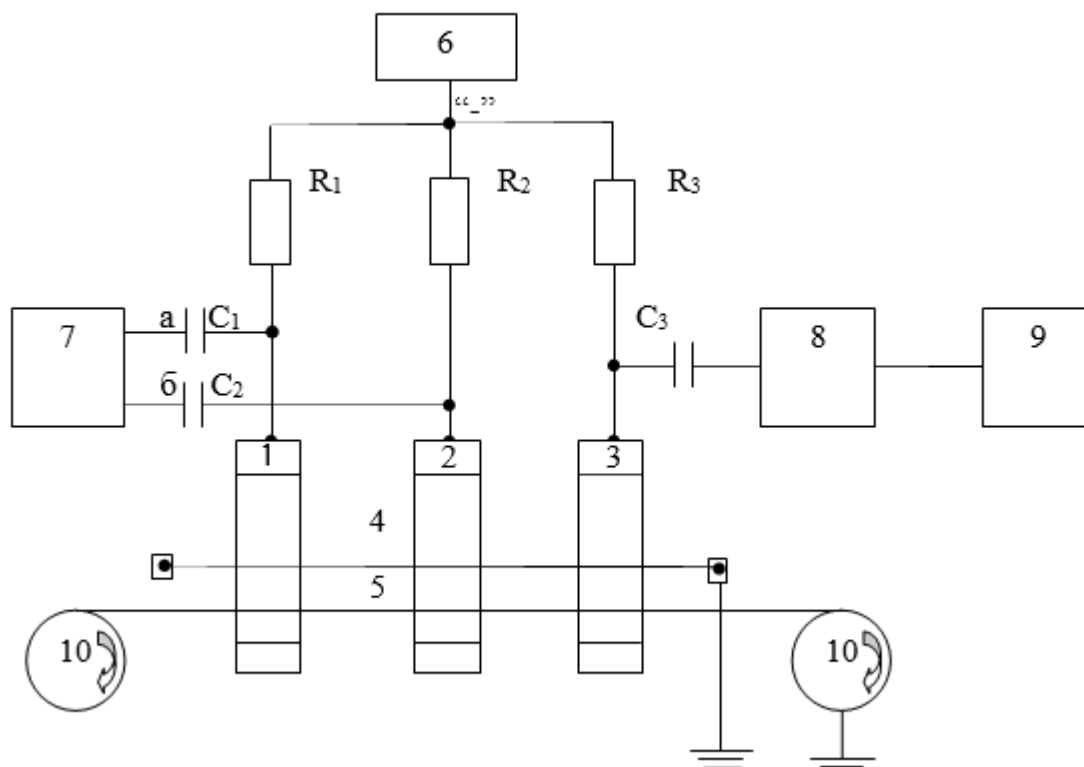
Не меньшую актуальность имеет разработка устройства для измерения диаметра движущихся диэлектрических нитей и оптических волокон (10 - 125 микрон).

Известно устройство по способу контроля неоднородности движущихся диэлектрических нитей [111], содержащее два кольцевых электрода, concentрично охватывающие общий коронирующий электрод в виде проволоки, источники высоковольтного питания с постоянным стабилизированным напряжением на выходе, нагрузочное сопротивление и вольтметр постоянного тока, причем контролируемая диэлектрическая нить протягивается через внешнюю зону коронного разряда, где равномерность распределения объемного заряда наиболее высока. В этом устройстве из-за присутствия эффекта стабилизации тока разряда при последовательном соединении двух зон коронного разряда, влияния изменения состояния атмосферного воздуха на точность контроля объекта будут незначительными. На самом деле, влияния изменения состояния атмосферного воздуха на разрядные токи в двух электродах могут существенно отличаться. Так как, при одинаковых напряжениях на электродах отрицательный коронный разряд протекает более эффективно и к тому же установлено, что при коронировании микроэлектродов отрицательной полярности всегда присутствует импульсный режим разряда. В предложенном устройстве также не учтено влияние отличия краевых эффектов двух электродов. Все это может в значительной степени снизить точность измерения устройства.

Главным отличительным признаком разработанного устройства является то, что во всех трех электродах используется начальный участок вольтамперной характеристики положительного коронного разряда, когда коронный разряд находится в «ждущем» режиме, причем зарядка ионами поверхности движущейся диэлектрической нити происходит при подаче на средний электрод дополнительных импульсов отрицательной полярности в виде полуволн синусоидального напряжения. При этом, средний электрод охвачен с двух сторон электродами аналогичной формы и размеров, что исключает влияние краевых эффектов на этот электрод при импульсной зарядке нити [112].

На рисунке 3.32 представлена функциональная схема устройства для измерения диаметра диэлектрической нити в процессе ее протяжки. Устройство содержит три плоскопараллельных электрода 1, 2, 3, идентичных по форме и размерам и расположенных на заданных расстояниях, коронирующую проволоку 4, контролируемую диэлектрическую нить 5, источник высоковольтного питания с отрицательной полярностью на выходе 6, источник однополярных импульсов 7, амплитудный детектор 8 и вольтметр постоянного тока 9. Подача импульсных сигналов, на высоковольтные точки измерительной схемы осуществляются высоковольтными конденсаторами С1 и С2, а съем их также через конденсатор С3. Стабилизация электрических характеристик коронного разряда в электродах и создание условия «ждущего» режима, обеспечиваются с помощью высокоомных сопротивлений R1, R2, R3 и подбором величины высокого напряжения. На рисунке 3.33 показана схема источника однополярных импульсов, состоящая из повышающего трансформатора Тр со средней точкой во второй обмотке и двух амплитудных

преобразователей (D1 R4 и D2 R5). Он вырабатывает два вида однополярных импульсов для дополнительного питания электродов 1 и 2 [113].

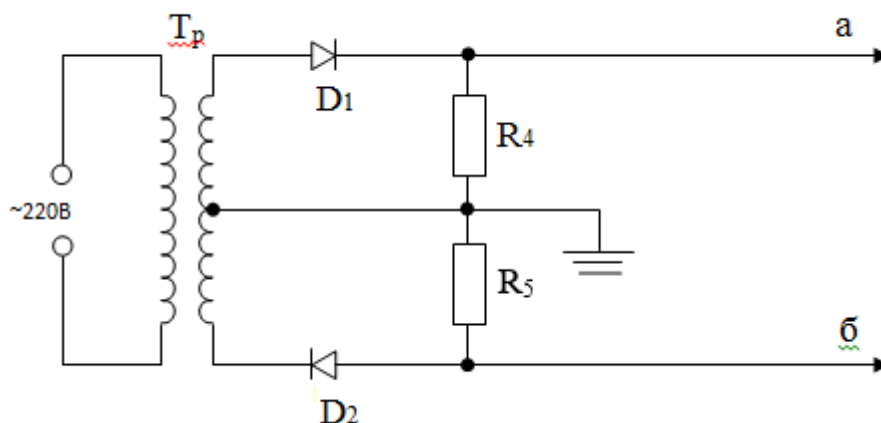


1,2,3 – три идентичных электрода плоскопараллельной формы, 4 – коронирующая проволока, 5 – диэлектрическая нить, 6 – источник питания, 7 – источник однополярных импульсов, 8 – амплитудный детектор, 9 – вольтметр постоянного тока, 10 – перемоточная установка

Рисунок 3.32 – Функциональная схема устройства для измерения диаметра диэлектрической нити

При подаче достаточно высокого напряжения отрицательной полярности на внешние электроды создаются условия для возникновения положительного коронного разряда между ними и проволокой 4. Затем, регулируя значения высокого напряжения 6 и с помощью высокоомных сопротивлений $R_1 - R_3$ добиваются получения «ждущего» режима во всех разрядных промежутках. После этого, от источника однополярных импульсов подают через C_1 на средний электрод 2 импульсы отрицательной полярности в виде полуволн синусоидального напряжения. При этом, в разрядном промежутке электрода 2 возникает импульсный коронный разряд, который заряжает положительными ионами поверхность диэлектрической нити 5, находящейся во внешней зоне разряда. Ввиду скоротечности перехода ионов разрядного промежутка (20 – 30 мкс) за время полуволны синусоидального напряжения диэлектрическая нить успевает зарядиться до «предельного заряда» в соответствии с теорией Потенье [114]. По этой теории установлено,

что «пределный заряд» движущейся нити при постоянстве диэлектрической проницаемости материала будет, в первую очередь, зависеть от размеров площади поверхности нити, т.е. от её диаметра. Заряженная диэлектрическая нить поступает в электрод 3, находящийся в режиме «ожидания» и там разряжается. При разрядке нити на нагрузке R3 электрода 3 возникают импульсные сигналы, пропорциональные «пределному заряду» нити [115].



Тр – повышающий трансформатор, D1 R4 и D2 R5 – амплитудные преобразователи, а – выход полуволны синусоидального напряжения положительной полярности, б - выход полуволны синусоидального напряжения отрицательной полярности

Рисунок 3.33 – Схема источника однополярных импульсов

Импульсные сигналы преобразуются в амплитудном детекторе в постоянное напряжение, которое измеряется вольтметром постоянного тока. Градуировка шкалы вольтметра производится заранее по известным стандартным диаметрам диэлектрической нити. Одним из отличий устройства является то, что одновременно с полуволной отрицательной полярности синусоидального напряжения, поданного на электрод 2, полуволна положительной полярности подается на электрод 1, при этом, закрывается разрядный промежуток электрода 1 и исключается зарядка нити «темным» током коронного разряда, находящего в «ждущем» режиме [116].

Устройство имеет следующие параметры: плоскопараллельные электроды имеют ширину 1,5 см, рабочая длина – 1 см, зазор между ними – 0,1 см, диаметр коронирующей проволоки из вольфрама – 100 микрон, контролируемая нить расположена на расстоянии 0,3 см от поверхности внешнего электрода, балластные сопротивления R1, R2, R3 равнялись 1 МОм, конденсаторы C1, C2, C3 – 1 мкФ. В качестве высоковольтного питания использован источник напряжения типа ВС – 22 [117].

Опытные измерения показали, что изменения состояния окружающего атмосферного воздуха и скорости движущейся нити не оказывают существенного влияния на точность измерения диаметра нити, которая составила порядка 1 - 2 % от измеряемого диаметра. Полученная точность

измерения диаметра нити соответствует градуировочной кривой, построенной по известным стандартным диаметрам в диапазоне 20 – 100 микрон [118].

На основе импульсных характеристик униполярного коронного разряда разработано устройство для бесконтактного и непрерывного измерения диаметра движущихся диэлектрических нитей, в том числе оптических волокон (10 – 125 микрон) в процессе их изготовления [119].

Выводы по третьей главе

Основные результаты, полученные в третьей главе:

1. В результате проведенного научного эксперимента в лаборатории InPhoTech – innovation photonics technology, Университет им. Марии Кюри-Склодовской, г.Люблин, Польша, описаны особенности технологического процесса вытяжки оптического волокна.

2. Путем экспериментального исследования получены допустимые отклонения размера диаметра готового ОВ, допустимые отклонения температуры в ВТП.

3. Путем экспериментального исследования определены условия измерения диаметра ОВ и точность нанесения лакового покрытия.

4. Построена структурная модель системы автоматического управления натяжением вытягиваемого оптического волокна, с учетом влияния температуры в ВТП, скорости вытяжки, скорости подачи преформы и её диаметра.

5. Представлена процедура разработки Σ -ЧИСАУ температурным режимом вытяжки оптического волокна.

6. Рассмотрено построение математической модели подсистемы непосредственного цифрового управления (НЦУ) режимными параметрами процесса вытяжки оптического волокна.

7. Осуществлен параметрический синтез Σ -ЧИСАУ температурным режимом вытяжки оптического волокна, вследствие которого найдены оптимальные параметры регулятора.

8. На основе импульсных характеристик униполярного коронного разряда разработано устройство для бесконтактного и непрерывного измерения диаметра движущихся диэлектрических нитей, в том числе оптических волокон (10 – 125 микрон) в процессе их изготовления.

9. Разработано устройство для бесконтактного и непрерывного измерения скорости протяжки диэлектрических нитей оптического волокна, применение которых обеспечит автоматический контроль и управление технологическим процессом изготовления ОВ.

10. Результаты исследований, представленные во второй главе, опубликованы в [99, 102, 103, 105, 106, 107, 109, 110, 116].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В процессе выполнения данной работы, поставленная цель и задачи диссертации выполнены в полном объеме.

Основные результаты, полученные в диссертационной работе:

1. Выполнен анализ основных этапов технологического процесса вытяжки оптического волокна, это этап приготовления преформы (заготовки) и этап вытяжки световода из разогретой стекломассы.

2. Технологический процесс вытяжки оптического волокна рассмотрен как объект автоматического управления.

3. Рассмотрены достоинства и недостатки систем автоматического управления применяемые в ТП вытяжки оптического волокна: ПИД – регулятор, Адаптивная система управления, Робастно прогнозируемая система, Интеллектуальная автоматизированная система ситуационного управления (ИАССУ), а также, Системы управления по возмущению и отклонению.

4. Выявлено, что рассмотренный ТП, как объект управления, характеризуется многомерностью, стохастическим характером возмущающих воздействий, значительной инерционностью процессов и наличием запаздывания.

5. Обосновано, что наиболее перспективным является применение частотно-импульсных систем автоматического управления объектами с запаздыванием.

6. Выявлено, что до настоящего времени данный регулятор не применялся в ТП вытяжки оптического волокна и поэтому данное исследование является новым направлением и с научной и с практической точки зрения.

7. Обосновано, что для разработки и исследования системы управления температурным режимом оптического волокна, необходимо разработать математические модели и оценить настроечные параметры регулятора.

8. Выявлена необходимость разработки устройства для бесконтактного измерения диаметра движущегося оптического волокна.

9. Выявлена необходимость разработки устройства для бесконтактного измерения скорости протяжки движущегося оптического волокна.

10. На основе проведенного анализа сформулированы цель и задачи данного диссертационного исследования.

11. Обоснована необходимость разработки новых классов математических моделей стохастических частотно – импульсных систем автоматического управления объектами с запаздыванием;

12. Обозначены этапы процедуры параметрического синтеза Σ -ЧИСАУ температурным режимом высокотемпературной печи вытяжки оптического волокна;

13. Дано описание принципа действия Σ -частотно-импульсной системы управления объектами с запаздыванием;

14. Построена эквивалентная стохастической модель сигма частотно - импульсной системы с запаздыванием, где модулятор заменяется нелинейной системой, процессы которой, эквивалентны исходному модулятору.

15. Описана процедура мажорирующей системы, характеризуемой более простой структурой. Эти системы отличаются от исходных тем, что в них показатели состояния, вызванные внутренними нелинейными преобразованиями случайных процессов, оцениваются внешними аддитивными и мультипликативными случайными шумами.

16. Построена математическая модель Σ -ЧИСАУ объектами с запаздыванием в виде стохастических дифференциальных уравнений Ланжевена.

17. Построена математическая модель Σ -ЧИСАУ объектами с запаздыванием в форме стохастических дифференциальных уравнений в форме Ито.

18. Проведено экспериментальное исследование математической модели стохастических систем с Σ -ЧИСАУ для объекта с запаздыванием.

19. Даны этапы статистического цифрового моделирования стохастической системы автоматического управления с Σ -ЧИСАУ.

20. Полученные, в результате экспериментального исследования, оценки показывают, что разработанные модели адекватны исходной системе.

21. Полученные математические модели дают возможность провести синтез данного класса систем.

22. В результате проведенного научного эксперимента в лаборатории InPhoTech – innovation photonics technology, Университет им. Марии Кюри-Склодовской, г.Люблин, Польша, описаны особенности технологического процесса вытяжки оптического волокна.

23. Путем экспериментального исследования получены допустимые отклонения размера диаметра готового ОВ, допустимые отклонения температуры в ВТП.

24. Путем экспериментального исследования определены условия измерения диаметра ОВ и точность нанесения лакового покрытия.

25. Построена структурная модель системы автоматического управления натяжением вытягиваемого оптического волокна, с учетом влияния температуры в ВТП, скорости вытяжки, скорости подачи преформы и её диаметра.

26. Представлена процедура разработки Σ -ЧИСАУ температурным режимом вытяжки оптического волокна.

27. Рассмотрено построение математической модели подсистемы непосредственного цифрового управления (НЦУ) режимными параметрами процесса вытяжки оптического волокна.

28. Осуществлен параметрический синтез Σ -ЧИСАУ температурным режимом вытяжки оптического волокна, вследствие которого найдены оптимальные параметры регулятора.

29. На основе импульсных характеристик униполярного коронного разряда разработано устройство для бесконтактного и непрерывного измерения диаметра движущихся диэлектрических нитей, в том числе оптических волокон (10 – 125 микрон) в процессе их изготовления.

30. Разработано устройство для бесконтактного и непрерывного измерения скорости протяжки диэлектрических нитей оптического волокна, применение которых обеспечит автоматический контроль и управление технологическим процессом изготовления ОВ.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

- 1 Алексеева Л.Б. Определение требований к проектированию механизмов вытяжки стеклянных стержней. Горный информационно – аналитический бюллетень. 2017. - №4. - С. 16 – 22.
- 2 Старченко С.А. Система автоматического управления процессами вытяжки и намотки оптического волокна: дисс. ...канд.тех.наук: 05.13.06 – Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами (легкая промышленность). – 168 с.
- 3 Шишов О.В., Слугин А.Г. Особенности формирования математической модели системы управления линией вытяжки оптоволоконной. Вопросы современных технических наук: свежий взгляд и новые решения // Сборник научных трудов по итогам международной научно-практической конференции. г. Екатеринбург, - НН: ИЦРОН, 2019. - № 6. – 30 с.
- 4 Шабарова Л.В. Численное моделирование термовязкопластических процессов при вытяжке волоконных световодов: дисс. ...канд.тех.наук: 05.13.06 – Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами (легкая промышленность). – 176 с.
- 5 Шишов О.В. Современные технологии промышленной автоматизации. Саранск : Изд-во Мордов. ун-та, 2009. – 276 с.
- 6 Шишов О.В. Технические средства автоматизации и управления. – М. : ИНФРА- М, 2011. – 397 с.
- 7 Пат. РФ. Способ изготовления оптического волокна / Замятин А.А., Иванов Г.А., Маковецкий А.А., Шилов И.П. 27.10.2010.
- 8 Пат. №2201583. РФ MKUG01L 5/10. Устройство измерения натяжения оптического волокна / Чостковский Б.К.. 27.03.2003. - БИ №9.
- 9 Давыдов А.Р., Гарбузенко М.А. Имитационная модель адаптивного управления вытяжкой оптических волокон / Перспективы науки. 2014. - №3(54). – С. 65 – 69.
- 10 Европейский патент P226396, INT Cl. G 01 L 5/10 Non-contact monitoring of optical fibre tension - by measuring fibre vibration frequency / Smith G.E.-EP479120A.
- 11 Aitchanov B.H., Wojcik W., Tergeusizova A.S., Optical fiber exhaust management systems and innovative technologies for its production N E W S OF THE NATIONAL ACADEMY OF SCIENCES OF THE REPUBLIC OF KAZAKHSTAN SERIES OF GEOLOGY AND TECHNICAL SCIENCES ISSN 2224-5278. – 2017. – Vol. 3, № 423. – P. 206 – 212
- 12 Дианов Е.М., Кашин В.В., Перминов С.В., Перминова В.Н., Русанов С.Я., Сысоев В.К. и др. Динамика тепловых процессов при вытяжке кварцевых волоконных световодов // ЖТФ. - 1987. - Т.57, Вып.8. - С.1562-1569.
- 13 Тергеусизова А.С., Основы автоматизации процесса вытяжки световодов в волоконно – оптических линиях связи и их основные

характеристики. XV международная научно-практическая конференция: «Естественные и технические науки в современном мире» г. Москва: сборник со статьями (уровень стандарта, академический уровень). – М: Научный журнал "Chronos", 2017. – 60 с.

14 Айтчанов Б.Х., Тергеусизова А.С. Технологический процесс вытяжки оптических стержней как объект автоматизированного управления // Доклады Национальной академии наук Республики Казахстан. 2017. - № 2. - С. 91-95.

15 Лопаткина М.В. Исследование и разработка системы автоматического управления температурными режимами в процессе текстурирования синтетических нитей: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук: 05.13.06 – Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами (легкая промышленность). – 2006. – 164 с.

16 Васильев В.Н., Дульнев Г.Н., Наумник В.Д. Исследование нестационарных условий формирования оптического волокна // ИФЖ. - 1990. - Т.57, №3. - С. 499-505.

17 Чостковский Д.Б. Структурный синтез системы управления процессом вытяжки градиентных оптических волокон // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия: Технические науки. 2010. - №4 (27). - С. 72-77.

18 Галиуллин Р.Ш. Идентификация и автоматическое управление технологическим процессом вытяжки оптического волокна: Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук, Самара, 2011. – 108 с.

19 Пестерев А.А. Оптимальное управление подвижным источником теплового воздействия при легировании заготовок кварцевых оптических волокон: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук: 05.13.06 – Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами (легкая промышленность) - 2019. – 114 с.

20 Первадчук В.П., Владимирова Д.Б., Гордеева И.В. Оптимальное стабилизирующее управление процессом вытяжки оптического волокна в условиях неизотермичности // №6 201 Спецвыпуск «Фотон экспресс наука». 2019. - С. 371-372.

21 Первадчук В.П., Владимирова Д.Б., Гордеева И.В. Оптимальное стабилизирующее управление процессом вытяжки кварцевых оптических волокон // Фотон-экспресс. 2021. - №6 (174). - С. 317-318.

22 Первадчук В.П., Владимирова Д.Б., Гордеева И.В. Оптимальное стабилизирующее управление процессом вытяжки оптического волокна в условиях неизотермичности // Прикладная фотоника. 2019. - № 3-4 - С. 215-229.

23 Беленков А.Ю. Автоматизация технологического процесса получения преформ для вытяжки оптического волокна с помощью технологий дополненной реальности. Материалы региональной научно-технической

конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Студенческая весна». Спб, 2023. – 123 с.

24 Лесникова Ю.И. Математическое моделирование термовязкоупругого поведения оптических волокон типа PANDA и его конструктивных элементов: Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук, Пермь, 2022. – 18 с.

25 Стерлинг Д. Волоконная оптика: учебное пособие; пер. с англ. – М., 2020. – 304 с.

26 Hui R. Introduction to fiber-optic communications. – Cambridge: Academic Press, 2020. – 123 p.

27 Philippi J., Bechert M., Chouffart Q., Waucquez C., Scheid B. Linear stability analysis of nonisothermal glass fiber drawing // Physical Review Fluids. – 2022. – Vol. 7. – 043901 p.

28 Низяев Е.А. Моделирование системы автоматического управления процессом вытяжки микроструктурированного оптического волокна // Радиоэлектроника и молодежь в XXI веке: материалы 16-го Междунар. молодеж. форума, 9 апр. 2012 г. – Харьков: ХНУРЭ, 2012. - Т. 2. - С. 44–45.

29 Ревяко М.М., Прокопчук Н.Р. Теоретические основы переработки полимеров : учеб. пособие для студентов по специальностям «Химическая технология органических веществ, материалов и изделий», «Упаковочное производство», «Машины и технология обработки материалов давлением» – Минск : БГТУ, 2009. – 305 с.

30 Чостковский Д.Б. Структурный синтез системы управления процессом вытяжки градиентных оптических волокон // Вестник СамГТУ. Сер. Технические науки. – Самара, 2010. – Вып. 4. – С. 72-77.

31 Никифоров А.Д. Процессы управления объектами машиностроения / А. Д.Никифоров, А.И.Ковшов, Ю.Ф.Назаров - М.: Высш.шк., 2001. - 455 с.

32 Гроднев И.И., Мурадян А.Т., Шарафудзинов Р.М. и др. Волоконно-оптические системы передачи и кабели: справочник - М. : Радио и связь, 1993. - 264 с.

33 Moh. Yasin, Sulaiman W. Harun and Hamzah Arof. RECENT PROGRESS IN OPTICAL FIBER RESEARCH. Published by InTech Janeza Trdine 9, 51000 Rijeka, Croatia. ISBN 978-953-307-823-6. – 2012. – 462 p.

34 Bakr Ahmed Taha, Norazida Ali, Nurfarhana Mohamad Sapiee, Mahmoud Muhanad Fadhel, Ros Maria Mat Yeh, Nur Nadia Bachok, Yousif Al Mashhadany and Norhana Arsad, Comprehensive Review Tapered Optical Fiber Configurations for Sensing Application: Trend and Challenges. Biosensors. - 2021. - №11. - 253 p. <https://doi.org/10.3390/bios11080253>

35 Chouffart Q., Simon P., and Terrapon V.E. Numerical and experimental study of the glass flow and heat transfer in the continuous glass fiber drawing process, J. Mater. Process. Technol. 2016. – P. 924-932.

- 36 Волкова А.А., Шишкунов В.Г. Системный анализ и моделирование процессов в техносфере : учеб. пособие - Екатеринбург : Изд-во Урал. ун-та, 2019. - 244 с.
- 37 Тергеусизова А.С. Системы управления процесса вытяжки оптического волокна и инновационные технологии производства. // Вестник КазНУ 2018. - №3 - С. 439 – 447.
- 38 Иванов Г.А., Первадчук В.П. Технология производства и свойства кварцевых оптических волокон: учеб. пособие. – Пермь: Изд-во Перм. нац. исслед. политехн. ун-та, 2011. – 171 с.
- 39 Первадчук В.П., Владимирова Д.Б., Деревянкина А.Л. Исследование влияния технологических и геометрических параметров на стабильность изотермического процесса вытягивания кварцевых труб // Перспективы науки. – 2015. – №10(73). – С. 110-115.
- 40 A novel technique for active fiber production. Ruth Renner – Enry, Loredana Di Labio, Willy Luthy. Optical Materials. 2007. – Vol.29, Issue 8. – P. 919-922.
- 41 Уваров В.П. Теоретические основы оценки параметров автоматизированного управления процессом вытяжки световодов: дисс. ... док.тех.наук: 05.13.06 – Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами (легкая промышленность). - Санкт – Петербург, 2004. – 244 с.
- 42 Никифоров А.Д., Ковшов А.И., Назаров Ю.Ф. Процессы управления объектами машиностроения - М.: Высш.шк., 2001. - 455 с.
- 43 Давыдо А.Р., Баянов К.Н. Исследование процесса вытяжки оптических волокон на основе его имитационной модели // Глобальный научный потенциал. – СПб.: ТМБпринт. – 2013. - №8. – С. 54 – 57.
- 44 Айтчанов Б.Х. Стохастические частотно – импульсные системы с запаздыванием. – Алматы: Строительство и архитектура, 2005. – 160 с.
- 45 Tergeussizova A.S. Analysis of research methods of automatic control systems with dynamic frequency – pulse modulation / Международная научно – практическая конференция «Theoretical and Practical aspects of research», г. София, Болгария, 2019. – С.167 - 172
- 46 Емельянов С.В. Системы автоматического управления с переменной структурой. М.: Наука, 1967. – 487 с.
- 47 Васильев В.Н., Дульнев Г.Н., Наумник В.Д. Исследование нестационарных условий формирования оптического волокна // ИФЖ. - 1990. - Т.57, №3. - С. 499-505.
- 48 Гроднев И.И., Мурадян А.Т., Шарафудзинов Р.М. и др. Волоконно-оптические системы передачи и кабели: справочник - М.: Радио и связь, 1993. - 264 с.

49 Попков Ю.С., Ашимов А.А., Асаубаев К.Ш. Статистическая теория автоматических систем с динамической частото – импульсной модуляцией. М.: Наука, 1988. – 258 с.

50 Асаубаев К.Ш., Ашимов А.А., Попков Ю.С. Статистический анализ автоматических систем с динамической частотно – импульсной модуляцией // АиТ, 1980. - №4. - С. 49-60.

51 Ашимов А.А., Асаубаев К.Ш., Айтчанов Б.Х. Статистический анализ модифицированной интегральной частотно – импульсной системы управления объектами с запаздыванием // Вопросы создания АСУ технологическими процессами и предприятиями. Алма-Ата: КазПТИ, 1981. - С. 24-36.

52 Гурецкий Х. Анализ и синтез систем управления с запаздыванием. М.: Машиностроение, 1974. – 327 с.

53 Янушевский Р.Т. Управление объектами с запаздыванием. М.: Наука, гл.ред.физ.мат.лит., 1978. - 416 с.

54 Айтчанов Б.Х., Тергеусизова А.С. Аналитическая модель зоны формирования оптоволоконка как упруго – вязкая среда / IV Международная научно-практическая конференция "Информатика и прикладная математика", посвященная 70-летию юбилею профессоров Биярова Т.Н., Вальдемара Вуйчика и 60-летию профессора Амиргалиева Е.Н., , Алматы, Казахстан, 2019. – С. 563 – 568.

55 Откер Р. О регулируемости объектов с запаздыванием // Тр. 1-го конгресса ИФАК. М.: АН СССР, 1961. - Т. 1. - С. 3-10.

56 Айтчанов Б.Х., Тергеусизова А.С., Применение сигма частотно – импульсной системы автоматического управления в процессе вытяжки оптического волокна. Вестник Алматинского университета энергетики и связи. 2018. - №4 (2) (43) - С. 92-107.

57 Айтчанов Б.Х. Стохастические частотно-импульсные системы с запаздыванием. – А36 Алматы: КазНТУ, 2007.- 160 с.

58 Tergeussizova A.S., Aitchanov B.H., Toigozhinova A.Zh. Application of Dynamic Frequency – Pulse Automatic Control Systems the Optical Fiber Exhaust // 5th International Conference on “Innovative Trends In Multidisciplinary Academic Research” (ITMAR- 2018), Istanbul, Turkey. – P. 35 – 44.

59 Бесекерский В.А., Попов Е.П. Теория систем автоматического регулирования. М.: Наука, 1972. – 768 с.

60 Айтчанов Б.Х. Методы математического описания частотно – импульсных систем управления объектами с запаздыванием // Вестник Казахского национального технического университета имени К.И.Сатпаева. 2002. - №2(30). - С. 73-82.

61 Айтчанов Б.Х., Тергеусизова А.С. Применение сигма частотноимпульсной системы автоматического управления в процессе вытяжки оптического волокна / X Международная научно-техническая

конференция, Алматинского университета энергетики и связи посвященной памяти Первого ректора Гумарбека Даукеева», 2018. – С.72-79

62 Айтчанов Б.Х., Тергеусизова А.С. Один подход к построению математических моделей частотно – импульсных систем автоматического управления режимными параметрами процесса вытяжки оптического волокна. Материалы Международной научно – практической онлайн конференции на тему «Современные информационные технологии и компьютерное моделирование систем». – Кызылорда: КУ имени Коркыт Ата, 2021. – С. 58 – 64.

63 Айтчанов Б.Х., Тергеусизова А.С. Частотно – импульсная система управления в процессе изготовления оптического волокна / IV Международная научно-практическая конференция "Информатика и прикладная математика", посвященная 70-летию юбилею профессоров Биярова Т.Н., Вальдемара Вуйчика и 60-летию профессора Амиргалиева Е.Н., Алматы, Казахстан, 2019. – С. 152 – 168.

64 Попков Ю.С., Ашимов А.А., Асаубаев К.Ш. Статистическая теория автоматических систем с динамической частотно – импульсной модуляцией. М.: Наука, 1988. – 258 с.

65 Ашимов А.А., Попков Ю.С., Асаубаев К.Ш., Айтчанов Б.Х. Интегральные частотно – импульсные автоматические системы управления объектами с запаздыванием. // Кибернетика и автоматика. Алма-Ата: КазПТИ, 1978. - Вып. 7. - С.12-17.

66 Тергеусизова А.С., Описание частотно – импульсной системы автоматического управления стохастическими дифференциальными уравнениями // International scientific journal «Global science and innovations 2020: Central Asia», Nur-Sultan, Kazakhstan, Feb – March 2020. – С. 52-56.

67 Макаров И.М., Лохин В.М., Иадыгулов Р.У. и др. Временимпульсные системы автоматического управления. под общей редакцией Макарова И.М. М.: Машиностроение, 1991. – 288 с.

68 Ашимов А.А., Асаубаев К.Ш., Айтчанов Б.Х. Статистический анализ модифицированной интегральной частотно – импульсной системы управления объектами с запаздыванием // Вопросы создания АСУ технологическими процессами и предприятиями. Алма-Ата: КазПТИ, 1981. - С.24-36.

69 Попков Ю.С., Киселев О.Н., Петров Н.П., Шмультян Б.Л. Идентификация и оптимизация нелинейных стохастических систем. М.: Энергия, 1976. – 438 с.

70 Aitchanov B., Tergeussizova A., Majorizing model of a Σ -frequency pulse system for automatic temperature control of the optical fiber drawing process / XVI Международная конференция по электронике, компьютерам и вычислениям (ICECCO), Университете имени Сулеймана Демиреля, Казахстан. 2021. – С. 195-200.

- 71 Тихонов В.И. Статистическая радиотехника. М.: Сов.радио. 1966. – 678 с.
- 72 Тихонов В.И., Миронов В.А., Марковские процессы. М.: Сов. радио, 1977. – 488 с.
- 73 Тергеусизова А.С. Математическое моделирование процесса вытяжки оптического волокна / Материалы международной научно-практической конференции «Современное математическое образование: опыт, проблемы, перспективы», посвященной 80-летию юбилею доктора педагогических наук, профессора Каиржана Габдулловича Кожабаева. Казахстан, Кокшетау, 2018. – С. 220-223.
- 74 Тергеусизова А.С. Математическое моделирование процесса вытяжки оптического волокна с аналитикой его внутреннего диаметра. / Материалы Международной научно – практической конференции «Наука, образование и производство в условиях четвертой промышленной революции». Караганды: типография КарНУ, 2018. - С. 536-540.
- 75 Вонэм В.М. Стохастические дифференциальные уравнения в теории управления // Математика / Сб. переводов. М., 1973. - №4. - С.129-165.
- 76 Гурецкий Х. Анализ и синтез систем управления с запаздыванием. М.: Машиностроение, 1974. – 327 с.
- 77 Айтчанов Б.Х., Вуйчик В., Тергеусизова А.С. Стохастические дифференциальные уравнения в описании сигма частотно – импульсной системе управления температурным режимом процесса вытяжки оптического волокна. // XII Международная научно – техническая конференция «Энергетика, инфокоммуникационные технологии и высшее образование». НАО «Алматинский университет энергетики и связи имени Гумарбека Даукеева». Алматы, 2022. – С.226-234.
- 78 Солодовников В.В., Филимонов А.Б. Конструирование регуляторов для объектов с запаздыванием. // Изв. АН СССР «Техническая кибернетика», 1979. - № 1. - С.168-177.
- 79 Айтчанов Б.Х., Тергеусизова А.С. Частотно – импульсное управление режимными параметрами процесса вытяжки оптического волокна. // VIII Международная научно – практическая конференция «Информатика и прикладная математика» Алматы, Казахстан. 2023. - С.375-382.
- 80 Хасьминский Р.З. Устойчивость систем дифференциальных уравнений при случайных возмущениях их параметров. М.: Наука, 1969. – 367 с.
- 81 Кузнецова И.Ю., Численное решение стохастического дифференциального уравнения методом Эйлера-Маруямы, // Междунар.науч.-исслед.журн. выпуск11, 2013. - С. 8–11.
- 82 Стратонович Р.Л. Избранные вопросы теории флуктуаций в радиотехнике М., Советское радио 1961. – 558 с.

83 Шабарова Л.В. Развитие и применение методов вычислительного эксперимента для моделирования и совершенствования технологии оптических волокон. Вестник Нижегородского университета им. Н. И. Лобачевского, 2011. - №4 (3). - С. 1259-1261.

84 Айтчанов Б.Х., Вуйчик В., Тергеусизова А.С. Цифровое статистическое моделирование сигма частотно – импульсной системы управления температурным режимом процесса вытяжки оптического волокна. // XII Международная научно – техническая конференция «Энергетика, инфокоммуникационные технологии и высшее образование». НАО «Алматинский университет энергетики и связи имени Гумарбека Даукеева». Алматы, 2022. – С. 235-242

85 Тхан В.З., Берчук Д.Ю. Системы автоматического управления объектами с запаздыванием: робастность, быстродействие, синтез. // Программные продукты и системы / Software & Systems. 2017. - № 1 (30). - С. 45-50.

86 Прохоров С.А. Моделирование и анализ случайных процессов. Лабораторный практикум. – 2-е изд., переработанное и дополненное / СНЦ РАН, 2002. – 277 с.

87 Сидоров А.И., Никоноров Н.В. Материалы и технологии волоконной оптики: специальные оптические волокна - Санкт-Петербург: , 2009. - 130 с.

88 Замятин А.А., Иванов Г.А., Маковецкий А.А. Кварц – полимерные оптические волокна для медицины. ЛЕСНОЙ ВЕСТНИК. 2008. - №4. - С.133-135.

89 Галиуллин Р.Ш. Идентификация и автоматическое управление технологическим процессом вытяжки оптического волокна. Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. Самара, 2011. - 108 с .

90 Чостковский Б.К., Галиуллин Р.Ш. Математическое моделирование и управление технологическим процессом вытяжки оптических волокон Вестник СамГТУ. Серия "Технические науки", 2011. - С. 52-57.

91 Чостковский Б.К. Методы и системы оптимального управления технологическими процессами производства кабелей связи. Монография. – М.: Машиностроение, 2009. – 190 с.

92 Трофимова Т.И. Курс физики: учеб. пособие для вузов. 11-е изд., стер. М.: Издательский центр «Академия», 2006. – 560 с.

93 Пат. №2154812. РФ, МПК G 01 L 5/10. Устройство измерения натяжения вытяжки оптического волокна / Б.К. Чостковский, Д.Б. Чостковский, Г. Штайнике, М. Виттманн. – БИ №23, 2000.

94 Иоргачев Д.В., Бондаренко О.В. «Волоконно-оптические кабели и линии связи.» — М.: Эко-Трендз, 2002. – 277 с.

95 Чостковский Д.Б. Структурный синтез системы управления процессом вытяжки градиентных оптических волокон // Вестник СамГТУ. Сер. Технические науки. – Самара, 2010. – Вып. 4. – С. 72-77.

96 Соловьев Д.В. Нейросетевой метод оптимизации математических моделей сложных технологических процессов. Научно-технический вестник Санкт-Петербургского государственного университета информационных технологий, механики и оптики, 2010. - № 6 (70). – С. 33-38.

97 Айтчанов Б.Х. Разработка и исследование стохастических динамических частотно – импульсных систем автоматического управления объектами с запаздыванием. Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук. Специальность 05.13.06 – Автоматизация и управление технологическими процессами (по отраслям). – Алматы, 2004. – 316 с.

98 Ицкович Э.Л. О построении схемы регулирования для объектов с чистым запаздыванием, Автомат. И телемех., 1959. – Т.20, выпуск 8. - С.1047–1055.

99 Новиков В.П. Автоматизация литейного производства. Часть 1. Управление литейными процессами: Учебное пособие. – М.: МГИУ, 2008. – 292 с.

100 Кондратьев Г.М., Дульнев Г.Н., Платунов Е.С., Ярышев Н.А. Прикладная физика: Теплообмен в приборостроении. Санкт – Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики. – СПб.: ИВА, 2003. – 513 с.

101 Бахтаев Ш.А., Боканова А.А., Бочкарева Г.В., Сыдыкова Г.К. Физика и техника коронно разрядных приборов. Алматы, 2007. – 278 с.

102 Бахтаев Ш.А., Тергеусизова А.С., Тойгожинова А.Ж., Разработка метода для измерения скорости протяжки диэлектрических нитей. Вестник КазАТК, 2018. - № 4 (107). - С. 193 – 199.

103 Предпатент №12038 РК МПК G01 P 3/00. «Способ измерения скорости протяжки микропровода» / Абишев М.А., Бахтаев Ш.А., Бочкарева Г.В., Баймаханова З.А., Титова Т.С. Оpubл.16.09.2002

104 Ильинский В.М. Бесконтактное измерение расходов. М.Энергия, 1970. - С. 5 – 28.

105 Бахтаев Ш.А., Тергеусизова А.С., Тойгожинова А.Ж., Разработка методов для измерения линейных параметров движущихся диэлектрических нитей. Вестник КазНУ, 2018. - №6. - С. 90 – 97.

106 Aitchanov B.H., Bakhtayev S.A., Wojcik W., Tergeusizova A.S., Toigozhinova A.Z. Development of methods for measuring linear parameters of moving dielectric filaments. News of the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan, Series of Geology and Technical Sciences, 2018. - № 3(430). - С. 62–68.

107 Джуварлы Ч.М., Горин Ю.В., Мехтизаде Р.Н., Коронный разряд в электроотрицательных газах. Баку, ЭЛМ, 1988. – 144 с.

108 Tergeussizova A.S., Bakhtaev S.A., Waldemar Wojcik, Ryszard Romaniuk, Aitchanov B.H., Mussapirova G.D., and Toygozhinova A.Zh. Measurement of linear parameters of dielectric filaments based on the corona discharge. // International Journal of Electronics and Telecommunications, 2021. - № 67(1). - P. 133–138.

109 Бахтаев Ш.А., Тергеусизова А.С., Мусапирова Г.Д. Газоразрядные измерители на основе коронного разряда для измерения линейных параметров микропровода / XI Международная научно-техническая конференция «Энергетика, инфокоммуникационные технологии и высшее образование», посвященная 45-летию образования Алматинского университета энергетик и связи имени Гумарбека Даукеева, 2020. - С. 287-289.

110 Бахтаев Ш.А., Тергеусизова А.С., Мусапирова Г.Д., Разработка устройства для измерения диаметра движущихся диэлектрических нитей. Вестник КазАТК 2018. - № 4 (107). - С.199 – 204.

111 Предпатент №12030. РК «Способ контроля неоднородностей движущихся диэлектрических нитей» / Абишев М.А., Бахтаев Ш.А., Бочкарева Г.В., Баймаханова З.А., Титова Т.С., Опубл. 16.09.2002г., МПК G01 B7/12

112 Abdreshova S.B., Bakhtaev S.A., Toigozhinova A.Zh., Mussapirova G.D., Tergeussizova A.S. and Taurbekova A.A. Development and Research of the Ozonator at the Crow – Barried Discharge // International Journal of Engineering Research and Technology. ISSN 0974-3154, - 2019. – Vol.12, №12. - P. 2446-2451.

113 Бахтаев Ш.А., Тергеусизова А.С., Тойгожинова А.Ж. Газоразрядные измерители на основе коронного разряда для измерения линейных параметров диэлектрических нитей / XI Международная научно-техническая конференция «Энергетика, инфокоммуникационные технологии и высшее образование», посвященная 45-летию образования Алматинского университета энергетик и связи имени Гумарбека Даукеева, 2020. - С. 290-292.

114 Верещагин И.П. Коронный разряд в аппаратах электронно-ионной технологии. М., Энергоатомиздат, 1985 – 159 с.

115 Предпатент №12030. РК «Способ контроля неоднородностей движущихся диэлектрических нитей» / Абишев М.А., Бахтаев Ш.А., Бочкарева Г.В., Баймаханова З.А., Титова Т.С., Опубл. 16.09.2002г., МПК G01 B7/12

116 Бахтаев Ш.А., Кожаспаев Н.К., Коджабергенова А.К. Расчет электрических полей униполярной короны со сложной конфигурацией электродов // Вестник АУЭС, 2015. - №1(28). - С. 46-51.

117 Бахтаев Ш.А., Бочкарева Г.В., Мусапирова Г.Д. Методы определения размерных параметров чехла униполярной короны. // Вестник КазАТК, 2014. - №5(90). – С. 92-97.

118 Бахтаев Ш.А., Бочкарева Г.В., Мусапирова Г.Д. Non-contact measurement meters of micro-sizes on coronary discharge // Известия НАН РК, 2017. - №424 . - С. 208-218.

119 Tergeussizova A.S., Bakhtaev S.A., Waldemar Wojcik, Aitchanov B.H., Mussapirova G.D., and Toygozhinova A.Zh.. Corona discharge based meters for manufacturing of conducting microwires // International Journal of Electronics and Telecommunications, 2021. - № 67(2). - P. 283–288.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Код программы simulink описания регулятора Σ - чим

```
function y = generateArr(n)
    % Persistent variable to keep track of the index
    persistent currentIndex;

    % Initialize the index if not already done
    if isempty(currentIndex)
        currentIndex = 1;
    end

    % Check if there are more elements to output
    if currentIndex <= numel(n)
        % Output the current element
        y = n(currentIndex);

        % Increment the index
        currentIndex = currentIndex + 1;
    else
        % Output 0 once all elements have been processed
        y = 0;
    end
end
```

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

Код программы разработки блока сброса в simulink

```
function y = tfWithTimeDelay(sample_time, tau_m, u)
    % Args:
    %   sample_time - Sample time, seconds
    %   tau_m - Time delay, seconds
    %   u - Input signal

    % Discretize the transfer function with time delay
    num = [0 1-exp(-sample_time/tau_m)];
    den = [1, -exp(-sample_time/tau_m)];

    % Apply the discretized transfer function to the input signal
    y = filter(num, den, u);
end
```

Рисунок Б.1 – Фрагмент кода программы разработки блока сброса в Simulink

```
function y_star = generate_out_signal(t, coeff_arr, time_arr)
    % Args:
    %   t - time vector
    %   coeffs - array of the  $\lambda_{(n+1)}$  coeffs
    %   times - array of the time instances  $t_{(n+1)}$ 

    % Init vector with nulls
    y_star = zeros(size(t));

    % Iterate through the coeffs and time instances
    for n = 1:length(coeff_arr)
        % Variable to store result of the subtracting current time and
        % time from vector
        dirac_res = t - time_arr(n);

        % Embedded dirac function:
        %  $\delta(x)$ :  $x = (x == 0) ? \text{inf} : 0$ ;
        if (dirac_res == 0)
            dirac_res = inf;
        else
            dirac_res = 0;
        end

        % Adding the delta function at the corresponding time
        y_star = y_star + coeff_arr(n) * dirac_res;
    end
end
```

Рисунок Б.2 – Код разработки блока функции, генерирующей блок сброса

ПРИЛОЖЕНИЕ В

Патент РК на полезную модель №3400 – Устройство для измерения скорости протяжки диэлектрических нитей

ҚАЗАҚСТАН РЕСПУБЛИКАСЫ
РЕСПУБЛИКА КАЗАХСТАН
REPUBLIC OF KAZAKHSTAN

**ПАТЕНТ
PATENT**
№ 3400

ПАЙДАЛЫ МОДЕЛЬГЕ / НА ПОЛЕЗНУЮ МОДЕЛЬ / FOR UTILITY MODEL

 (21) 2018/0174.2
(22) 19.03.2018

Қазақстан Республикасы пайдалы модельдер мемлекеттік тізілімінде тіркеу күні
/ Дата регистрации в Государственном реестре полезных моделей Республики
Казахстан / Date of the registration in the State Register of Utility Models of the
Republic of Kazakhstan: 16.11.2018

(54) Диэлектрлік желілердің тарту жылдамдығын өлшейтін құрылғы
Устройство для измерения скорости протяжки диэлектрических нитей
Device for measuring the speed of dielectric threads pulling

(73) Қазақстан Республикасы Білім және ғылым министрлігінің шаруашылық жүргізу құқығындағы "әл-Фараби
атындағы Қазақ ұлттық университеті" республикалық мемлекеттік кәсіпорыны (KZ)
Республиканское государственное предприятие на праве хозяйственного ведения "Казахский национальный
университет имени аль-Фараби" Министерства образования и науки Республики Казахстан (KZ)
"Al-Farabi Kazakh National University" Republican State Enterprise on the Right of Economic Management of the
Ministry of Education and Science of the Republic of Kazakhstan (KZ)

(72) Бахтаев Шабден Абуович (KZ) Bakhtayev Shabden Abuovich (KZ)
Тергеусизова Алия Советжановна (KZ) Tergeusizova Aliya Sovetzhonovna (KZ)
Айтчанов Бекмурза Хусайнович (KZ) Aytchanov Bekmurza Khusainovich (KZ)
Сыдыкова Гульнар Кудайбергеновна (KZ) Sydykova Gulnar Kudaybergenovna (KZ)
Тойгожинова Айнур Жумакановна (KZ) Toygozhinova Aynur Zhumakanovna (KZ)





«Ұлттық зияткерлік меншік институты» РМК директоры
Директор РГП «Национальный институт интеллектуальной собственности»
Director of RSE «National institute of intellectual property»

ҚАЗАҚСТАН РЕСПУБЛИКАСЫ



РЕСПУБЛИКА КАЗАХСТАН

**АВТОРДЫҢ КУӘЛІГІ
УДОСТОВЕРЕНИЕ АВТОРА**

№ 105955

Тергеусизова Алия Советжановна (KZ)

және/и Бахтаев Шабден Абуович (KZ); Айтчанов Бекмурза Хусаинович (KZ); Сыдыкова
Гульнар Кудайбергеновна (KZ); Тойгожинова Айнур Жумақановна (KZ)

*пайдалы модельдің авторы(лары) болып табылатындығы осымен куәландырылады
является(ются) автором(ами) полезной модели*

(11) 3400

(54) Диектрлік желілердің тарту жылдамдығын өлшейтін құрылғы
Устройство для измерения скорости протяжки диэлектрических нитей

(73) Қазақстан Республикасы Білім және ғылым министрлігінің шаруашылық жүргізу
құқығындағы "әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті" республикалық
мемлекеттік кәсіпорыны (KZ)
Республиканское государственное предприятие на праве хозяйственного ведения
"Казахский национальный университет имени аль-Фараби" Министерства образования и
науки Республики Казахстан (KZ)



«Ұлттық зияткерлік меншік институты» РМК директоры
Директор РГП «Национальный институт интеллектуальной собственности»

Патент РК на полезную модель №3452 – Устройство для измерения диаметра движущихся диэлектрических нитей



ҚАЗАҚСТАН РЕСПУБЛИКАСЫ



РЕСПУБЛИКА КАЗАХСТАН

**АВТОРДЫҢ КУӘЛІГІ
УДОСТОВЕРЕНИЕ АВТОРА**

№ 106308

Тергеусизова Алия Советжановна (KZ)

және/и Бахтаев Шабден Абуович (KZ); Айтчанов Бекмурза Хусаинович (KZ); Сыдыкова Гульнар Кудайбергеновна (KZ); Мусапирова Гульзада Даулетбековна (KZ)

*пайдалы модельдің авторы(лары) болып табылатындығы осымен куәландырылады
является(ются) автором(ами) полезной модели*

(11) 3452

(54) Диэлектрлік желілердің қозғалыс кезінде диаметрін өлшейтін құрылғы
Устройство для измерения диаметра движущихся диэлектрических нитей

(73) Қазақстан Республикасы Білім және ғылым министрлігінің "әл-Фараби атындағы
Қазақ ұлттық университеті" шаруашылық жүргізу құқығындағы республикалық
мемлекеттік кәсіпорыны (KZ)
Республиканское государственное предприятие на праве хозяйственного ведения
"Казахский национальный университет имени аль-Фараби" Министерства образования и
науки Республики Казахстан (KZ)



«Ұлттық зияткерлік меншік институты» РМК директоры
Директор РГП «Национальный институт интеллектуальной собственности»

ПРИЛОЖЕНИЕ Г

Акт производственных испытаний

ПЕЧАТЬ Pracownia Technologii Światłowodów UMCS ul. Murkowskiego 24, 20-032 Lublin, tel. 81 432 71 11	УТВЕРЖДАЮ _____ Prof. dr hab. inż. Andrzej Pasieka «18» 04 2018r.
АКТ производственных испытаний сигма частотно-импульсной системы стабилизации температурного режима процесса вытяжки оптического волокна в Pracownia Technologii Światłowodów UMCS	
Настоящий акт составлен о том, что результаты исследований докторанта 3-го года обучения Казахского национального университета им. аль – Фараби специальности 6D070200 – Автоматизация и управление, Тергеусизовой Алии Советжановны, на тему «Разработка моделей и исследование системы управления температурным режимом вытяжки оптического волокна», использованы при автоматизации технологического процесса вытяжки оптического волокна в Pracownia Technologii Światłowodów UMCS	
На базе теоретических результатов, полученных Тергеусизовой А.С., разработана система стабилизации температурного режима в высокотемпературной печи (индукционная печь) башни вытяжки оптического волокна.	
В подсистеме стабилизации температурного режима реализован алгоритм сигма частотно-импульсной модуляции, учитывающие особенности технологического процесса плавления кварцевого стекла в центральном канале высокотемпературной кольцевой печи и зоны перетяжки оптического волокна как объекта с запаздыванием (оно определяется временем прохождения вытягиваемого стеклоизделия от зоны формирования до датчика, определяющего размеры поперечного сечения).	
Проектирование разработанной системы стабилизации температурного режима процесса вытяжки оптического волокна проведено с использованием программных средств, математических моделей и методов анализа стохастической устойчивости сигма частотно-импульсной системы управления.	
Проведенные испытания показали, что разработанная сигма частотно-импульсная система автоматического управления температурным режимом вытяжки оптического волокна обеспечивает более высокую точность стабилизации по сравнению с традиционными методами управления,	

вследствие чего повысилась производительность высокотемпературной печи на 3%, что приведет к увеличению объема выпуска вытягиваемого волокна, с учетом тренда сохранения диаметра, на 0,12%.

Годовой экономический эффект от внедрения автоматизированной системы управления температурным режимом вытяжки оптического волокна составил – 0,3 у.е., на 20 км. оптического волокна, вытягиваемого из одной преформы (заготовки).

Ответственные исполнители производственных испытаний:

Оператор: Grzegorz Wójcik

Главный инженер: Aleksander Walewski

Докторант

Тергеусизова А.С.

AKT

производственных испытаний устройства для измерения диаметра движущихся диэлектрических нитей и устройства для измерения скорости протяжки диэлектрических нитей в Pracownia Technologii Światłowodów UMCS

Протокол испытания:

1. Производственные испытания осуществлялись в соответствии с диссертацией темой докторанта 3-го года обучения Казахского национального университета им. аль – Фараби специальности 6D070200 – Автоматизация и управление, Тергеусизовой Алии Советжановны, на тему «Разработка моделей и исследование системы управления температурным режимом процесса вытяжки оптического волокна»;
2. Производственные испытания проводились в Pracownia Technologii Światłowodów UMCS.
3. Условия проведения испытаний: испытания проводились на башне вытяжки оптического волокна, путем интеграции датчика измерения диаметра и устройства измерения скорости протяжки движущихся диэлектрических нитей;
4. Объем производственных испытаний: измерение диаметра и скорости протяжки движущегося оптического волокна, в процессе его вытяжки, объемом 5км.
5. Сроки проведения: 16.05.2018;
6. Рекомендуемые варианты: согласно данным по таблице 1 рекомендуется осуществить вытяжку оптического волокна с сердечником 50мкм и оболочкой 125мкм, длиной в 5км, с измерением диаметра вытягиваемого волокна и скорости протяжки. Метод изготовления сердцевины волокна – модифицированный метод химического парового осаждения (MCVD).

Таблица 1

№	Диаметр сердечника и оболочки ОВ, мкм	Длина оптического волокна, км	Метод получения преформы	Скорость вытяжки, м/мин	Температура в высокотемпературной печи башни вытяжки,
1.	50/125	5	MCVD	25	2000

Результаты испытания:

Первое устройство предназначено для измерения диаметра тонких и сверхтонких диэлектрических нитей (20-125 микрон) в производственных условиях, может быть использовано при наладке и выборе технологии изготовления диэлектрических нитей и оптического волокна.

Устройство для измерения диаметра движущихся диэлектрических нитей, содержит два кольцевых электрода, коронирующую проволоку, источник высоковольтного питания, нагрузочное сопротивление, вольтметр постоянного тока, три плоскопараллельных электрода, идентичных по форме и размерам и расположенных на заданных расстояниях, источник однополярных импульсов и амплитудный детектор с закрытым входом.

Основным недостатком, известного аналогичного устройства контроля неоднородности движущихся диэлектрических нитей, является то, что на точность и надежность измерения могут существенно влиять изменения температуры, состав атмосферного воздуха и скорости потока волокон. Влияние изменения состояния атмосферного воздуха на разрядные токи в двух электродах могут существенно отличаться. Так как, при одинаковых напряжениях на электродах отрицательный коронный разряд протекает более эффективно и к тому же, установлено, что при коронировании микроэлектродов отрицательной полярности всегда присутствует импульсный режим разряда. В предложенном устройстве также не учтено влияние отличия краевых эффектов двух электродов. Все это может в значительной степени снизить точность измерения устройства.

В предложенном датчике для измерения диаметра движущихся диэлектрических нитей, достигаемым техническим результатом является высокая точность и надежность контроля, при этом обеспечивается независимость процессов измерений от состояния атмосферного воздуха и величины скорости протяжки контролируемой нити.

Опытные измерения показали, что изменения состояния окружающего атмосферного воздуха и скорости движущейся нити не оказывают существенного влияния на точность измерения диаметра нити, которая составила порядка 1 – 2 % от измеряемого диаметра. Полученная точность измерения диаметра нити соответствует градуировочной кривой, построенной по известным стандартным диаметрам в диапазоне 10 – 125 микрон.

Таким образом, с помощью предлагаемого устройства решена задача измерения диаметра движущихся диэлектрических нитей, что необходимо при наладке и выборе технологии изготовления оптического волокна.

Второе устройство предназначенное для измерения скорости протяжки диэлектрических нитей, содержит основной кольцевой электрод, охватывающий контролируемую проволоку, два дополнительных кольцевых электрода, идентичных по форме и размерам и расположенных соосно с двух сторон основного электрода, отличающейся тем, что два идентичных электрода плоскопараллельной формы, охватывающие соосно коронирующую проволоку, расположены в некотором удалении друг от друга, а контролируемая диэлектрическая нить проходит через разрядную зону, при том оно снабжено генераторами тактовых и опорных импульсов, электронным блоком и счетчиком импульсов.

Наиболее близким по технической сущности является устройство по способу измерения скорости протяжки микропроволоки. В данном устройстве отмечено, что применение балансной схемы измерения существенно снижает погрешности измерения скорости протяжки проволоки при изменениях электрических характеристик разрядов и геометрических параметров коронирующей проволоки. Между тем, из-за разного расположения дополнительных электродов, которые по сути являются измерительными, изменения температуры и давления окружающего атмосферного воздуха могут оказать

влияние в значительной степени на точность измерения. Кроме того, в предложенном устройстве, также не учтено влияние отличия красевых эффектов у двух дополнительных электродов. К тому же, из-за невозможности замены коронирующей микропроволоки на диэлектрическую нить, это устройство не пригодно для наших целей.

В предложенном устройстве измерения скорости протяжки движущихся диэлектрических нитей, достигаемым техническим результатом является то, что в отличие от известного устройства, содержащего основной кольцевой электрод, охватывающий контролируемую проволоку, два дополнительных кольцевых электрода, идентичных по форме и размерам и расположенных соосно с двух сторон, основного электрода, в предлагаемой полезной модели, два идентичных электрода плоскопараллельной формы, охватывающие соосно коронирующую проволоку, расположены в некотором удалении друг от друга, а контролируемая диэлектрическая нить проходит через разрядную зону, при том снабжено генераторами тактовых и опорных импульсов, электронным блоком и счетчиком импульсов.

Опытные измерения показали, что изменения давления атмосферного воздуха в пределах ± 20 кПа и диаметра проволоки на ± 10 микрон не оказывают влияния на точность измерения скорости протяжки диэлектрической нити, которая составила порядка 1 – 2% от измеряемой скорости. Полученная точность измерения скорости протяжки диэлектрической нити соответствует градуировочной кривой, построенной по значениям скоростей протяжки в диапазоне 1 – 150 м/мин, измеренных в стационарных условиях.

Таким образом, с помощью предлагаемого устройства решена задача бесконтактного и непрерывного измерения скорости протяжки тонких и сверхтонких диэлектрических нитей (10 – 125 микрон) в производственных условиях, что необходимо при наладке и выборе технологии изготовления оптического волокна.

Ответственные исполнители производственных испытаний:

Оператор: Grzegorz Wójcik

Главный инженер: Aleksander Walewski

Докторант

Тергеусизова А.С.

ПРИЛОЖЕНИЕ Д

Акт внедрения



УТВЕРЖДАЮ
Проректор по АД
Коньшин С.В.
09 2018г.

АКТ

об использовании в учебном процессе Алматинского университета энергетики и связи результатов диссертационной работы А.С.Тергеусизовой, представленной на соискание степени доктора философии по специальности «Автоматизация и управление»

Комиссия в составе директора Института систем управления и информационных технологий - Табултаева С.С., заведующего кафедрой «Автоматизация и управление» - Федоренко И.А., составили настоящий Акт о том, что в учебном процессе Алматинского университета энергетики и связи, использованы следующие результаты полученные Тергеусизовой А.С., в процессе научно-исследовательских работ по теме «Разработка моделей и исследование системы управления температурным режимом вытяжки оптического волокна»:

- сигма частотно-импульсные системы автоматического управления объектами с запаздыванием;
- анализ стохастической устойчивости сигма частотно-импульсной системы автоматического управления объектами с запаздыванием.

Данный материал применяется в виде лекции и практических работ по дисциплине «Нелинейные системы автоматического регулирования».

Директор ИСУиИТ

Табултаев С.С.

Зав.каф.АУ

Федоренко И.А.

УТВЕРЖДАЮ

Проректор по АД

Коньшин С.В.

2018г.



АКТ

Об использовании результатов докторской диссертации Тергеусизовой А.С., докторанта Казахского Национального Университета им. аль-Фараби представленной на соискание степени Доктора Философии – PhD по специальности 6D070200 – «Автоматизация и управление», в учебном процессе Алматинского университета энергетики и связи

Мы, нижеподписавшиеся, директор Института космической инженерии и телекоммуникаций - Балбаев Г.К., заведующий кафедрой Телекоммуникационных сетей и систем - Байкенов А.С., старший преподаватель каф. ТКСиС – Елизарова Е.Ю., составили настоящий Акт о том, что результаты темы докторской диссертаций: «Разработка моделей и исследование системы управления температурным режимом процесса вытяжки оптического волокна», внедрены в учебный процесс кафедры РЭТ Алматинского университета энергетики и связи в 2018-2019 учебном году.

Предложенные, в процессе выполнения научно-исследовательской работы, результаты по теме диссертации использованы при разработке конспекта лекции по дисциплине «Направляющие системы связи», а также используются при выполнении расчетно-графических, курсовых и дипломных работах. Кроме того, теоретические результаты использованы при разработке комплекса лабораторных работ по исследованию влияния температурного режима на затухание сигнала в оптическом волокне.

Директор ИКИиТК

Балбаев Г.К.

Зав.каф. ТКСиС

Байкенов А.С.

Старший преподаватель
каф. ТКСиС

Елизарова Е.Ю.