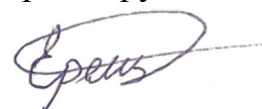


МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ  
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«МУРМАНСКИЙ АРКТИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

На правах рукописи



**ЕРЕЩЕНКО**  
**ВИКТОР ВАЛЕРЬЕВИЧ**

**УПРАВЛЕНИЕ ПРОЦЕССОМ ХОЛОДНОЙ СУШКИ  
ГИДРОБИОНТОВ С ПРИМЕНЕНИЕМ ТЕХНОЛОГИИ  
ИНТЕРНЕТА ВЕЩЕЙ И ТЕПЛОВИЗИОННОГО АНАЛИЗА**

Специальность 2.3.3 – Автоматизация и управление технологическими  
процессами и производствами

Диссертация на соискание учёной степени  
кандидата технических наук

Научный руководитель:

Благовещенский Иван Германович  
доктор технических наук, доцент

Мурманск – 2023

## СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	5
ГЛАВА 1. Исследование перспективных технологий обезвоживания гидробионтов.....	12
1.1 Основные сведения о технологическом процессе обезвоживания гидробионтов.....	12
1.1.1 Анализ современного состояния рыбной промышленности в области обезвоживания гидробионтов.....	12
1.1.2 Основные сведения о технологическом процессе обезвоживания гидробионтов.....	14
1.1.3 Основные закономерности процесса обезвоживания.....	15
1.2 Направления совершенствования процесса тепловой обработки и обезвоживания гидробионтов.....	17
1.3 Обзор цифровых промышленных технологий, применяемых при автоматизации и цифровизации систем управления пищевыми технологическими процессами.....	19
1.4 Типовая система управления сушильной камерой.....	25
1.5 Постановка цели и задачи исследования.....	27
Выводы по 1 главе.....	28
ГЛАВА 2. Разработка программно-аппаратного комплекса поиска оптимальных режимов холодной сушки гидробионтов.....	30
2.1 Программно-целевая модель исследований.....	30
2.2 Объект исследования.....	31
2.3 Малогабаритная сушильная установка УПОР-М.....	32
2.4 Выбор программно-аппаратного обеспечения.....	36
2.4.1 Разработка элементов для модернизации малогабаритной сушильной установки.....	36
2.4.2 Разработка формата передачи данных поверх протокола MQTT.....	39
2.4.3 Разработка информационного шлюза для сопряжения оконечных устройств с системой управления по протоколу MQTT и форматом данных VTF.....	51
2.4.4 Разработка модуля управления заслонками.....	54
2.4.5 Разработка модуля управления симисторами.....	56

2.4.6 Разработка модуля реле .....	59
2.4.7 Разработка системы сбора данных по температуре и относительной влажности .....	61
2.4.8 Разработка массоизмерительной системы .....	65
2.4.9 Выбор оборудования для измерения потребляемой мощности .....	69
2.4.10 Разработка системы тепловизионного контроля поверхности продукта.....	71
2.4.11 Выбор оборудования для управления процессом.....	77
2.4.12 Разработка графического пользовательского интерфейса .....	80
2.4.13 Система управления малогабаритной сушильной установкой .....	87
Выводы по 2 главе.....	90
<b>ГЛАВА 3. Результаты разработки программно-аппаратного комплекса и исследования.....</b>	<b>91</b>
3.1 Исследование теоретической модели тепловлажностной обработки сушильного агента .....	91
3.2 Исследование теоретической модели тепловлажностных процессов внутри секции сушки .....	108
3.3 Численное моделирование и синтез регуляторов системы автоматического управления .....	123
3.4 Исследование передачи данных в предлагаемом формате BTF по протоколу MQTT.....	126
3.5 Разработка алгоритма тепловизионного анализа поверхности гидробионтов .....	131
3.6 Предпосылки создания цифрового двойника процесса обезвоживания гидробионтов .....	140
3.7 Исследования применимости N-участкового переменного способа.....	141
Выводы по 3 главе.....	148
<b>ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....</b>	<b>150</b>
Список литературы .....	152
Список работ по теме диссертации .....	172
Список иллюстративного материала.....	179

ПРИЛОЖЕНИЕ 1 – Акт внедрения программы для ЭВМ «Модуль расчета потерь массы сырья».....	186
ПРИЛОЖЕНИЕ 2 – Акт о внедрении результатов НИР «Исследование, разработка и модернизация систем автоматического управления технологическими и производственными процессами».....	187
ПРИЛОЖЕНИЕ 3 – Патент на полезную модель «Устройство для непрерывного контроля теплового состояния электрического оборудования».....	188
ПРИЛОЖЕНИЕ 4 – Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ «Программа управления для программно-аппаратного комплекса тепловизионного контроля состояния электрооборудования и обследования электроустановок» .....	189
ПРИЛОЖЕНИЕ 5 – Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ «Программа управления системой воздушосмещения по беспроводному интерфейсу Wi-Fi» .....	190
ПРИЛОЖЕНИЕ 6 – Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ «Программа расчета степени открытия заслонок для процесса смешения воздуха».....	191
ПРИЛОЖЕНИЕ 7 – Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ «Программа управления для программно-аппаратного комплекса поиска оптимальных режимов холодной сушки гидробионтов» .....	192
ПРИЛОЖЕНИЕ 8 – Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ «Программа для платы управления поворотным механизмом системы тепловизионного контроля состояния электрооборудования и обследования электроустановок» .....	193
ПРИЛОЖЕНИЕ 9 – Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ «Программа управления для платы сбора данных» .....	194
ПРИЛОЖЕНИЕ 10 – Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ «Программа управления для платы управления включением и выключением холодильной машины» .....	195



## **ВВЕДЕНИЕ**

При хранении пищевых продуктов в их составе и качестве неизбежно происходят различные изменения, которые оказывают влияние, как на содержание, так и химический состав питательных веществ и биологически активных соединений. Данные процессы можно замедлить, используя различные методы, но полностью избежать нельзя. Поэтому возникает необходимость в оптимизации и подборе наиболее подходящих методов обработки и хранения пищевых продуктов.

Одним из таких методов консервирования в пищевой промышленности является сушка скоропортящихся продуктов. Для активности микроорганизмам и ферментам внутри продукта необходима влага. Сохранение продуктов питания путем сушки основано на том, что из продукта удаляются излишки влаги до такой степени, что деятельность микроорганизмов, вызывающих порчу пищевых продуктов и пищевые отравления, снижается. Процесс удаления влаги, чаще всего основан на использовании тепловой энергии и может приводить к структурным изменениям в продукте. Поэтому, большое внимание в настоящее время уделяется новым методам удаления влаги, позволяющим уменьшить структурные изменения в продукте и повысить энергоэффективность.

Благодаря консервированию методом сушки увеличивается срок хранения, повышается питательная ценность и калорийность, а также улучшаются вкусовые качества продуктов питания. Кроме того, этот метод консервирования позволяет уменьшить массу и объем сырья в несколько раз позволяя достичь большой экономии площадей при хранении и транспортировке. Продукты, законсервированные методом сушки, не нуждаются в обязательной герметичной упаковке и хорошо сохраняются в обычных складских помещениях.

Технология производства сушеной продукции проста и доступна для производственных предприятий, а применение новых методов позволяет расширить ассортимент готовой к употреблению продукции.

### **Актуальность темы исследования**

Традиционным сектором экономики Мурманской области, помимо добычи и переработки полезных ископаемых, является рыбная промышленность, играющая важную роль в социально-экономической специализации региона. Данная отрасль занимает четвертое место по значимости после горнодобывающей промышленности и энергетики. Однако, из-за сурового северного климата производство продукции в Мурманской области требует большого расхода энергоносителей, поэтому продукция при прочих равных условиях получается более дорогой.

Государственной программой Мурманской области «Рыбное и сельское хозяйство» от 11 ноября 2020 года с изменениями и дополнениями от 28 июля 2022 года закреплено повышение обеспечения населения рыбной продукцией местного производства. Помимо этого, государственной «Энергетической стратегией России до 2030 года» повышение энергетической эффективности промышленного оборудования закреплено на уровне правительства.

Термическая обработка является довольно распространенным процессом при консервировании в рыбной промышленности и требует значительных затрат энергии. Помимо этого, режимы обезвоживания часто разрабатываются на базе инженерных расчетов по упрощенным формулам. Разработка энергоэффективных режимов под уникальный продукт (или изменяемые параметры продукта) требует проведения экспериментальных исследований со значительными временными и энергетическими затратами. Поэтому разработка систем автоматического управления и методов, позволяющих достичь низкого энергопотребления, реализация адаптивных режимов обезвоживания рыбного сырья, повышение качества готовой продукции, является актуальной задачей на сегодняшний день.

### **Степень разработанности темы**

Вопросами теории и совершенствования техники и технологии сушки пищевых продуктов в конце прошлого века занимались такие учёные, как

Воскресенский Н. А., Кизеветтер И. Н., Гинзбург А. С., Лыков А. В., Базилевич В. И., Никитин Б. Н.

Вопросами совершенствования техники и технологии сушки занимались такие исследователи, как Ершов М. А., Ершов А. М., Селяков И. Ю., Бурдо О. Г., Терзиев С. Г., Суслов А. Э., Гроховский В. А.

Вопросами внедрения современных информационных технологий в технологические процессы занимались: Вотинков М. В., Благовещенская М. М., Жиров М. В., Красинский А. Я., Краснов А. Е., L. Wang, Z. Zhu, M. Iwase, S. Hatakeyama, Y. Shiino, J. Zhao, X. Liu, T. Dai, M. Velez-Reyes, C. Rentel-Gomez, S. Hosseinpour и др.

### **Цели и задачи исследования**

Целью диссертационной работы является повышение энергетической эффективности процесса холодной сушки и качества рыбной продукции при автоматическом управлении с применением технологии интернета вещей и тепловизионного анализа.

Для достижения поставленной цели необходимо решить комплекс задач:

1. разработать и предложить способ автоматического управления процессом холодной сушки гидробионтов;
2. провести цифровое моделирование тепловых и влажностных процессов при обезвоживании рыбного сырья;
3. разработать интеллектуальный датчик температуры поверхности для процесса холодной сушки;
4. модернизировать систему автоматического управления малогабаритной сушильной установки.

### **Объект и предмет исследования**

Объектом исследования данной работы является технологический процесс холодной сушки гидробионтов. Предметом исследования является автоматическое управление процессом холодной сушки гидробионтов в промышленных установках.

### **Научная новизна исследования**

Научная новизна диссертационного исследования заключается в том, что получены новые научные результаты:

1. разработан способ управления процессом обезвоживания по температуре и влагосодержанию;
2. разработан программно-аппаратный комплекс для исследования режимов обезвоживания;
3. разработан интеллектуальный датчик температуры поверхности рыбного сырья с применением тепловизионного анализа;
4. разработаны алгоритмы и программное обеспечение передачи потока данных с применением технологии интернета вещей.

### **Практическая значимость исследования**

В рамках диссертационной работы были разработаны и предложены:

1. элементы аппаратной составляющей комплекса: автоматические воздушные заслонки, генераторы тумана, нагреватели, регуляторы мощности, информационный шлюз с поддержкой формата VTF, камера подготовки сушильного агента, массоизмерительная подсистема для отслеживания динамики изменения массы в секции сушки, система непрерывного контроля теплового состояния поверхности продукта в секции сушки;
2. управляющие программы для элементов программно-аппаратного комплекса;
3. программное обеспечение системы управления и контроля процесса сушки;
4. методика построения подсистемы передачи данных с применением современных технологий интернета вещей (IoT);
5. методика построения дистанционного графического web-интерфейса оператора управления технологическим процессом;
6. методика построения компьютерной модели процесса обезвоживания, которая может быть использована для получения цифрового двойника сушильной установки.

Разработанный программно-аппаратный комплекс может быть использован в научно-исследовательских работах, направленных на изучение процесса холодной сушки. Предложенные технологии могут быть использованы в промышленности.

### **Степень достоверности.**

Достоверность полученных в работе результатов обеспечивается тщательной проработкой моделей исследуемых процессов, корректным применением методов аппроксимации, идентификации и теории оптимального управления, использованием апробированных расчетных методик, согласованием данных расчетов и экспериментов.

### **Научные положения, выносимые на защиту**

1. предложенная система автоматического управления процессом холодной сушки по температуре и влагосодержанию сушильного агента не требует дополнительного развязывания контуров температуры и относительной влажности;

2. в результате математического моделирования процесса сушки установлена зависимость температуры и влагосодержания приточного воздуха и сушильного агента в секции сушильной установки;

3. предложенные подсистемы контроля массы сырья, температуры поверхности рыбы посредством тепловизионного контроля в совокупности с видеомониторингом состояния рыбы (интеллектуальный датчик) позволяют снизить энергетические и временные затраты на разработку режима сушки;

4. предложенные алгоритмы и программное обеспечение подсистемы передачи потока данных с применением технологии промышленного интернета вещей позволяют реализовать их во встраиваемых системах;

5. технические решения, принятые для практической реализации способа автоматического управления в реальном времени процессом холодной сушки рыбного сырья являются основанием для разработки адаптивных переменных режимов обезвоживания.

Научные положения соответствуют 4, 5, 6, 11 и 12 областям исследований паспорта специальности 2.3.3 – Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами.

### **Степень достоверности и апробация результатов**

Основные результаты работы представлены и обсуждены на ежегодных научно-практических конференциях. Отдельные этапы работ были выполнены в рамках госбюджетной научно-исследовательской работы «Исследование, разработка и модернизация систем автоматического управления технологическими и производственными процессами» и проекта № 22-26-20116 «Создание ресурсо-энергосберегающих технологий конвективной обработки водных биоресурсов Северного бассейна» (при поддержке Российского научного фонда).

### **Личный вклад автора**

Результаты теоретических и экспериментальных исследований получены в 2014-2023 гг. лично автором и при его непосредственном участии. В работах, опубликованных в соавторстве, соискателю принадлежит основная роль при постановке и решении задач, а также обобщении полученных результатов.

### **Публикации**

По теме диссертации опубликовано 28 работ. В том числе 4 работы в российских научных периодических изданиях, рекомендованных ВАК РФ, и 2 работы, индексируемых в базе данных Scopus, получено 7 свидетельств о государственной регистрации программ для ЭВМ и 1 патент РФ на полезную модель. Имеются акты о внедрении результатов работы в учебный процесс и производство.

### **Структура и объем работы**

Диссертационная работа состоит из введения и трех глав, включающих обзор отечественной и зарубежной научно-технической литературы, существующих решений в области консервирования гидробионтов методом сушки, автоматизации данного процесса, результаты собственных исследований, заключение, список литературы и приложений. Основной текст работы изложен

на 195 страницах компьютерного текста, содержит 13 таблиц и 111 рисунков. Список литературных источников включает 130 наименований, в том числе 47 – иностранных авторов.

# **ГЛАВА 1. Исследование перспективных технологий обезвоживания гидробионтов**

## **1.1 Основные сведения о технологическом процессе обезвоживания гидробионтов**

### *1.1.1 Анализ современного состояния рыбной промышленности в области обезвоживания гидробионтов*

Одним из сегментов пищевой промышленности предназначенным для удовлетворения потребностей населения в рыбе и морепродуктах, а также производства кормов для сельского хозяйства и организованной поставки сырья фармацевтической промышленности, является рыбная промышленность.

В настоящее время Российская рыбная отрасль имеет положительную динамику после резкого снижения уловов в 1990-х годах. В 2019 году динамика снизилась, вылов рыбы и моллюсков составил 4,92 млн тонн, что на 2,2% меньше объема добычи предыдущего года - более 5 млн тонн; по данным Росрыболовства. Несмотря на некоторое снижение, показатели на 2020 год набрали положительную динамику и сохраняют ее [75].

По данным Росстата в структуре рыбной отрасли нашей страны хозяйственной деятельностью занимаются свыше 9 тыс. организаций, насчитывающих в своём составе более 700 тыс. человек. Это позволяет в значительной степени удовлетворить спрос населения на рыбные изделия и морепродукты.

Рыбные продукты благодаря своему составу играют важную роль в здоровом питании и обеспечивают сбалансированность рациона. На данный момент не существует альтернатив данному виду продуктов по ряду причин. Во-первых, рыба богата белком и содержит незаменимые аминокислоты. Помимо этого, наличие в ней ненасыщенных жирных кислот оказывает благоприятное воздействие на организм, уменьшая воспалительные процессы,



поддерживая сердечнососудистую систему и т.д. Натрий и фосфор способствует правильному функционированию щитовидной железы, обеспечивая регулирование процесса обмена веществ. А содержащийся кальций и основные витамины (В и D), являются необходимыми элементами для формирования костей.

Рыба является чрезвычайно скоропортящимся продуктом питания и нуждается в обработке для повышения срока хранения. Одним из способов сохранения рыбных продуктов является процесс обезвоживания.

Изготовление сушеных и вяленых рыбных продуктов занимает важное место в развитии рыбного производства и к 2030 году прогнозируется значительный рост производства различных видов сушено-вяленой рыбной продукции.

На сегодняшний день материально-техническая база рыбоперерабатывающей отрасли содержит большое количество не соответствующего современным требованиям оборудования, разработанного ещё в конце прошлого века, выработавшего свой ресурс и неспособного обеспечить требуемое качество протекания процессов. Эксплуатация такого оборудования требует постоянных затрат на ремонт и обслуживание, а также приводит к высоким энергозатратам на процесс, что в свою очередь приводит к повышенной себестоимости готовой продукции.

Поэтому разработка систем автоматического управления, реализующих передовые методы обработки, нового типа оборудования и интеллектуальных датчиков, является актуальной задачей. Повышение энергоэффективности процессов в рыбной промышленности, позволит снизить затраты на производство, что в свою очередь позволит сделать готовую продукцию более доступной для потребителя.

### *1.1.2 Основные сведения о технологическом процессе обезвоживания гидробионтов*

Сушка является старейшим методом сохранения продуктов питания. В процессе сушки происходит удаление влаги из продукта с использованием тепловой энергии для ее испарения и с отводом образующихся паров. Сушка является диффузионным процессом, так как переход влаги из материала в окружающую среду совершается при поверхностном испарении влаги и диффузии ее из внутренних слоев к поверхности материала.

Продолжительность процесса сушки зависит от множества факторов: размера продукта, содержания влаги и жира в нем, температуры, относительной влажности и скорости движения воздуха и т.д.

Сушка бывает естественной и искусственной. Искусственная сушка протекает в специальных сушильных камерах при заданных режимах, а естественная протекает в помещениях или на открытом воздухе, где условия определяются состоянием окружающей среды.

В зависимости от температуры, при которой происходит сушка продукта, различают горячую, холодную и сублимацией. Горячую сушку проводят при температурах выше 80 °С, холодную — не выше 25-30 °С. Сушка сублимацией происходит при температурах ниже -5 °С. Реже применяются методы полугорячей сушки — температура 60-70 °С и сушка вымораживанием, когда продукт периодически замораживается до температуры -3, -5 °С и размораживается, многократное замораживание, оттаивание нарушает связь воды с плотной частью, и вода вытекает.

По степени обезвоживания сырья всю продукцию, подвергнутую процессу сушки, делят на сушёную, вяленую и провесную. Эта классификация довольно условна. Сушёной называют рыбу с остаточной влажностью от 12 до 20 %, вяленой – рыбу с остаточной влажностью от 35 до 40 %, провесной – продукцию с содержанием влаги от 50 до 66 %.

Процесс сушки имеет ряд преимуществ по сравнению с другими методами консервирования продуктов питания: повышается энергетическая ценность

продукта, уменьшаются в несколько раз масса и объем сырья, а при хранении и транспортировке достигается большая экономия площадей.

Продукты, законсервированные методом сушки, не нуждаются в герметичной упаковке и хорошо сохраняются в обычных складских помещениях. Технология сушки проста и доступна для производственных предприятий.

Консервирование методом сушки осуществляется в специальных аппаратах – сушилках. Наиболее распространенными являются следующие типы сушилок:

— конвективные сушилки - в них основной сушащей средой в процессе обезвоживания служит атмосферный воздух, но при этом происходит интенсивное окисление жиров содержащихся в продукте, но сушку можно проводить и в других газовых средах для предотвращения этих процессов;

— кондуктивные сушилки, в которых высушиваемый материал соприкасается с нагретой поверхностью и сообщение ему энергии происходит посредством теплопроводности через сплошную среду;

— терморadiационные сушилки, в которых передача тепловой энергии материалу происходит посредством термоизлучения. Сюда относятся инфракрасные сушилки;

— комбинированные сушилки — передача тепла в них осуществляется с помощью комбинации упомянутых выше видов сушки;

— диэлектрические или высокочастотные сушилки — необходимая тепловая энергия преобразуется из электрической энергии внутри самого материала.

### *1.1.3 Основные закономерности процесса обезвоживания*

В состав рыбы входят плотные вещества и влага, поэтому следует различать влажность мяса рыбы и влажность всей рыбы. Как показали

исследования Коробейника А. В. рыба целиком в процентном отношении содержит влаги меньше, чем только одно мясо рыбы.

Рыба на протяжении всего процесса обезвоживания теряет влагу. Во время обезвоживания интенсивность удаления влаги изменяется. Продолжительность процесса обезвоживания  $\tau$  зависит от начальной влажности рыбы  $w_0$ , её геометрических размеров (удельной поверхности  $s/m$ ), температуры  $t$ , влажности  $\phi$  и скорости сушильного агента  $v$ . Эту зависимость в общем случае можно записать, как:

$$\tau = f(w_0, s/m, t, \phi, v). \quad (1.1)$$

Для того, чтобы вывести эмпирические уравнения зависимости продолжительности обезвоживания от этих факторов, необходимо провести серию экспериментов и исследовать полученные зависимости [8, 27, 28, 29, 32].

Для анализа кинетики сушки принято рассматривать влажность полуфабриката по отношению к массе сухого вещества. Типичная кривая процесса сушки представлена на рисунке 1.1. Из рисунка видно, что кинетическая кривая  $w = f_1(\tau)$  состоит из трех периодов: периода прогрева полуфабриката, периода постоянной скорости сушки и падающей скорости сушки.

В периоде прогрева, происходит разогрев полуфабриката, скорость сушки быстро увеличивается и достигает постоянного значения. Продолжительность данного периода зависит от геометрических размеров полуфабриката, а также от режима термической обработки. Зачастую периодом разогрева пренебрегают ввиду его малости.

В первом периоде скорость сушки полуфабриката постоянна. Период постоянной скорости сушки характеризуется снижением влагосодержания материала по линейному закону. Во втором периоде скорость сушки полуфабриката снижается с течением времени по степенной зависимости.

Периоды постоянной и убывающей скорости сушки разделяются точкой  $w_k$ , которая называется критическим влагосодержанием. Величина критического

влажностности и характер кинетических кривых зависят от физических характеристик и массы полуфабриката, от интенсивности и способа подвода к нему теплоты.

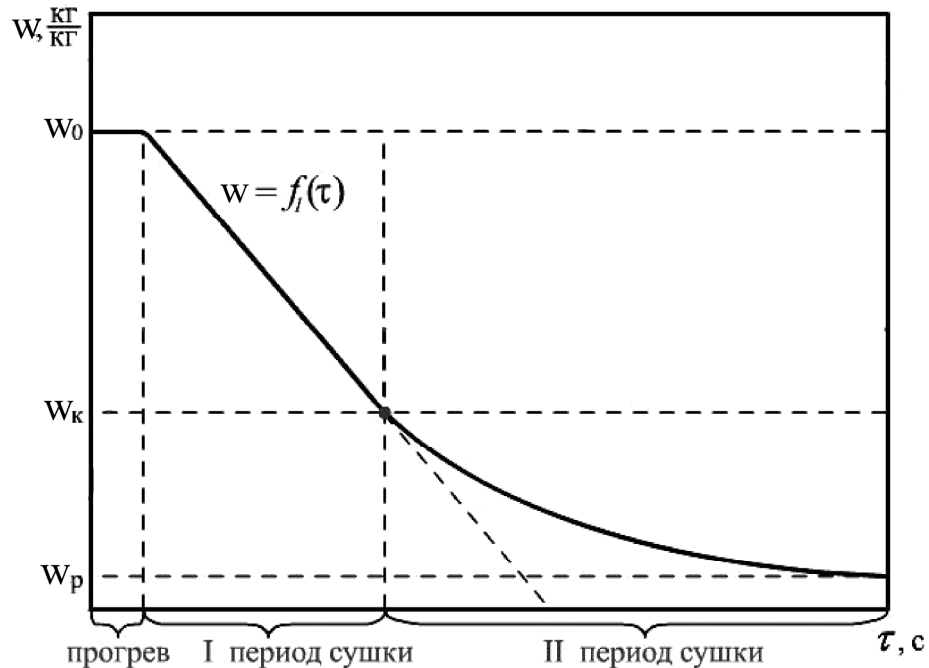


Рисунок 1.1 – Типичная кривая процесса сушки

## 1.2 Направления совершенствования процесса тепловой обработки и обезвоживания гидробионтов

Вопросами теории и совершенствования техники и технологии сушки пищевых продуктов в конце прошлого века занимались такие учёные, как Воскресенский Н. А., Кизеветтер И. Н., Гинзбург А. С., Лыков А.В., Базилевич В. И., Никитин Б. Н. В работах этих ученых описываются базовые принципы сушки гидробионтов различных пород [12, 38].

На сегодняшний день исследования в области обезвоживания рыбы показывают широкую географию учёных и исследователей, занимающихся сушкой гидробионтов, а также актуальность вопросов поиска рациональных комбинированных методов тепловой обработки [4, 6]. Однако, современные исследования в данной области в основном ведутся в регионах, для которых рыбная промышленность является традиционной.

Вопросами совершенствования техники и технологии сушки занимались такие исследователи, как Ершов М. А., Ершов А. М., Селяков И. Ю., Вотинов М. В., Бурдо О. Г., Терзиев С. Г., Суслов А. Э., Фатыхов Ю. А., Гроховский В. А. [13, 21, 41, 42, 61]

Исследователями Ершовым М. А. и Селяковым И. Ю. был разработан современный метод энергоэффективного конвективного обезвоживания. Процесс обезвоживания по данному способу состоит из непрерывной начальной фазы и последующих комбинированных периодов, включающих, в свою очередь, фазы сушки и релаксации влаги в рыбе. Технический результат предложенного способа заключается в эффективном обезвоживании рыбы, снижении затрат электрической энергии, рациональном использовании теплоносителя, сбережении ресурсов работы сушильного оборудования, повышении качества выпускаемой продукции.

Вотинов М. В. предложил стадийный метод сушки при работе комбинированного регулятора как наиболее оптимальный и энергоэффективный. В данном методе ведется параллельный контроль температуры поверхности рыбы и температуры в термокамере, который позволяет создать благоприятное температурное поле для протекания технологического процесса. Стадийная работа исполнительных механизмов при использовании комбинированного регулятора является наиболее энергоэффективным методом сушки, способствующим снижению затрат на производство сушеной продукции и, как следствие, на себестоимость готовой продукции.

Бурдо О. Г. и Терзиев С. Г. разработали технологию и доказали перспективность обезвоживания в электромагнитном поле микроволнового диапазона частот. Предложенный ими метод удаления влаги имеет ряд преимуществ по сравнению с традиционными методами. При подводе энергии градиент температуры направлен в середину продукта, что обеспечивает гидродинамический поток влаги из капилляров к поверхности. На нагрев сухой части продукта тратится меньшее количество энергии. А с сушильного

агента снимаются задачи теплоносителя, выполняя только роль абсорбента влаги. Техническая идея способа удаления влаги основывается на специфичном характере градиентов температур и влагосодержания в продукте при объемном, электромагнитном подводе энергии.

Суслов А. Э. и Фатыхов Ю. А. занимались проблемой выбора оптимальных параметров процесса сушки пищевых продуктов. Наиболее часто целевой функцией оптимизации процесса сушки выбирают его продолжительность. Суслов предложил формировать целевую функцию как показатель энергосбережения. На основе исследований различных видов рыбы, проведенных на кафедре пищевых и холодильных машин ФГБОУ ВО «КГТУ», было установлено, что снижение энергозатрат происходит при увеличении влажности воздуха, росте температуры, а также и ее уменьшении; при этом в последнем случае увеличивается продолжительность процесса сушки рыбы.

### **1.3 Обзор цифровых промышленных технологий, применяемых при автоматизации и цифровизации систем управления пищевыми технологическими процессами**

В Монографии «Комплексная модернизация систем управления процессами тепловой обработки водных биоресурсов Арктики с использованием интеллектуальных технологий» авторы Кайченев А. В., Благовещенский И.Г. предлагают способы управления, основанные на прогнозировании. Рассматриваются вопросы управления процессами тепловой обработки с прогнозирующими моделями. Для осуществления эффективного управления процессами тепловой обработки предлагаются ПИД-регуляторы с нечеткой коррекцией коэффициентов, а также нейросетевые прогнозирующие регуляторы [34].

В статье Research on Temperature and Humidity Decoupling Control of Constant Temperature and Humidity Test Chamber авторы Liheng Wang and Zhifeng

Zhu описывают систему управления температурой и влажностью рисунке 1.2. Для осуществления эффективного управления необходимо учитывать такие факторы, как нелинейность, большой гистерезис и изменение в реальном времени, а также наличие взаимной связи между температурой и влажностью. Позиционное ПИД-регулирование позволяет достичь удовлетворительных результатов. Авторами на основе анализа модели системы управления температурой и относительной влажностью предлагается к использованию метод компенсирующей развязки с прямой связью системы управления температурой и влажности (рисунок 1.3), что обеспечивает эффективный способ моделирования и управления системой температурой и относительной влажностью. Результаты моделирования (рисунок 1.4) показали, что система управления температурой и влажностью с компенсирующей развязкой достигает удовлетворительных результатов при различных экспериментальных условиях.

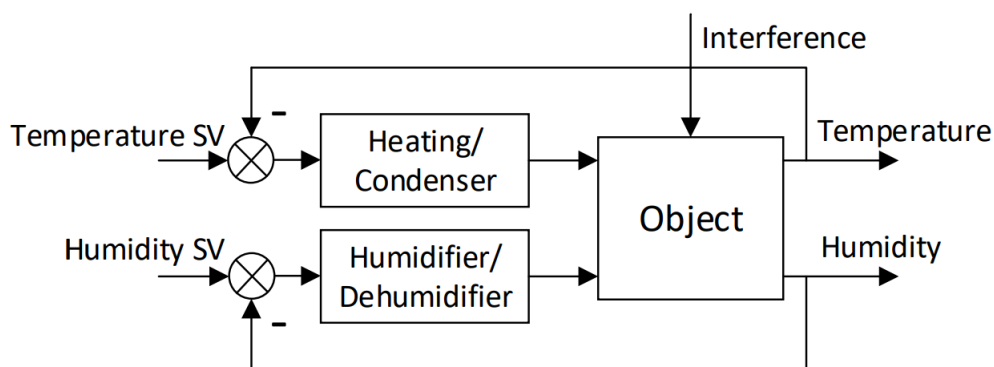


Рисунок 1.2 – Система управления температурой и влажностью

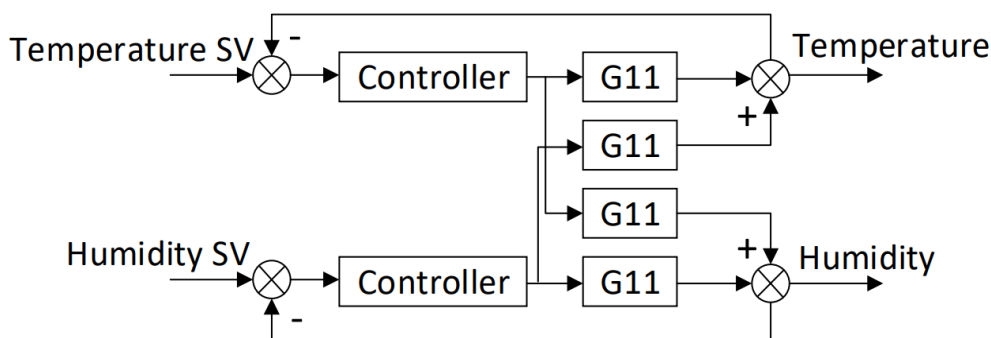


Рисунок 1.3 – Система управления температурой и влажностью с компенсирующей развязкой



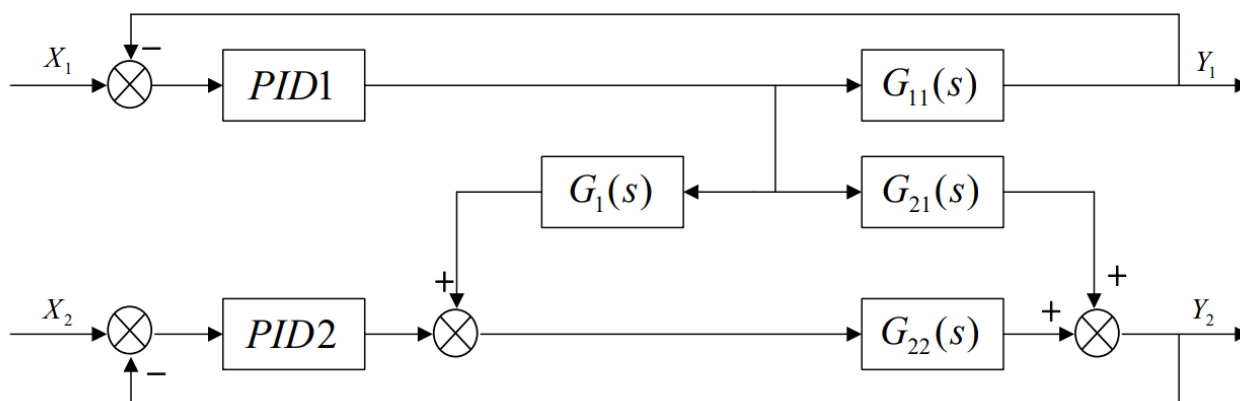


Рисунок 1.4 – Схема моделирования системы управления температурой и влажностью с компенсирующей развязкой

Аспекты промышленного применения MPC- регуляторов в реальном времени (RTO) для управления промышленной распылительной сушильной установкой, которая производит обогащенное сухое молоко описаны в статье Lars Norbert Petersen et all. Алгоритм MPC основан на модели передаточной функции с непрерывным временем, идентифицированной на основе данных и состояний, оцененных с помощью изменяющегося во времени фильтра Калмана. Применение MPC регулятора обеспечивает значительно лучший контроль содержания остаточной влаги, увеличивает производительность и снижает энергопотребление по сравнению с обычным ПИИ-регулятором.

В статье «On a continuous-time system identification using optimization method» M. Iwase, S. Hatakeyama, Y. Shiino предлагают метод идентификации моделей передаточных функций с непрерывным временем непосредственно с использованием выборочных данных ввода-вывода. В предлагаемом методе производные ввода-вывода получаются с помощью выходных данных фильтров, а передаточная функция может быть представлена в виде авторегрессионной модели с использованием производных. Этот метод отличается от традиционных методов идентификации параметров, основанных на методе наименьших квадратов, поскольку шум измерения учитывается в критерии явно, и задача идентификации может быть сформулирована как задача оптимизации с

ограничением. Эффективность метода проверяется на примере идентификации линейного двигателя.

В статье «Нечеткое управление температурой и влажностью в холодильных установках» авторы Becker; Oestreich; Hasse; Litz обсуждают стратегии управления холодильными системами с применением нечеткой логики. Для разработки такого управления требуется понимание динамики процесса. Поэтому для изучения динамических свойств холодильной камеры используется термодинамическая модель с акцентом на взаимосвязь температуры и относительной влажности. Благодаря этим знаниям, а также эвристическим знаниям инженеров-холодильщиков, предлагаются основанные на правилах стратегии управления холодильными системами. Для реализации используется метод нечеткой логики. Система с нечеткой логикой позволяет учитывать связь динамических переменных температуры и влажности. Моделирование работы системы управления показало, что нечеткий контроллер обеспечивает благоприятное поведение процесса, при воздействии возмущений или после изменения заданных значений [91].

В статье «Study on fuzzy decoupling control system» автор Jing Zhao предлагает реализовать интеллектуальное управление, называемое нечетким управлением развязкой. Для проектирования развязки используется метод единичной матрицы, который превращает систему связи давления и расхода в две независимые подсистемы. Результаты моделирования показывают, что управление с нечеткой развязкой эффективно решает проблему взаимосвязи расхода и давления [122].

В статье «A neuro-fuzzy decoupling approach for real-time drying room control in meat manufacturing» авторы Вэй Чжан Хонг Ма Саймон Х.Ян предложили метод устранения сильной связи между температурой и относительной влажностью в системах управления сушильными помещениями. Проблема с связанностью контуров влияет на точность управления, приводит к нестабильности системы, дополнительному потреблению энергии. В этой статье представлен метод разделения температуры и относительной влажности в

режиме реального времени. Развязка реализована с использованием адаптивной системы нейро-нечеткого вывода для контроля температуры и относительной влажности в сушильном помещении. Результаты моделирования показывают, что с применением способа управления с развязкой контуров значительно уменьшаются колебания относительной влажности [83].

В статье «Design for Fuzzy Decoupling Control System of Temperature and Humidity» авторы Xi-Wen Liu, Tie-Feng Dai описали метод нечеткого управления, реализующий развязку в системе управления температурой и влажностью. Сравнение результатов моделирования системы управления с нечеткой развязкой с результатами моделирования ПИД-регулятора показало высокую эффективность управления при применении предложенного авторами метода [97].

В статье «Decoupled control of temperature and relative humidity using a variable-air-volume HVAC system and non-interacting control» авторы M. Velez-Reyes и C. Rentel-Gomez описали разработанную ими нелинейную систему управления температурой и относительной влажностью в помещении с переменным объемом воздуха. Управление температурой и относительной влажностью с использованием многомерного каскадного управления с двумя контурами позволяет минимизировать связанность регулируемых параметров. Внутренний контур — это регулятор, используемый для развязки, а внешний контур — это контроллер PD, используемый для стабилизации и управления. Моделирование системы управления подтвердило правильность теоретических результатов [95].

В статье «Application of fuzzy logic in drying: A review» авторы Soleiman Hosseinpour и Alex Martynenko сделали обзор практически всех существующих применений нечеткой логики в технологии сушки для решения задач нелинейного моделирования, имитационного моделирования, распознавания образов, кластеризации, классификации, управления и оптимизации. Литература разделена на три основных потока: моделирование, кластеризация / классификация и управление (рисунок 1.5). Систематически рассматриваются

преимущества и недостатки приложений с нечеткой логикой. Предложили дорожную карту для будущих исследований нечеткой логики в технологии сушки (рисунок 1.6) [88].

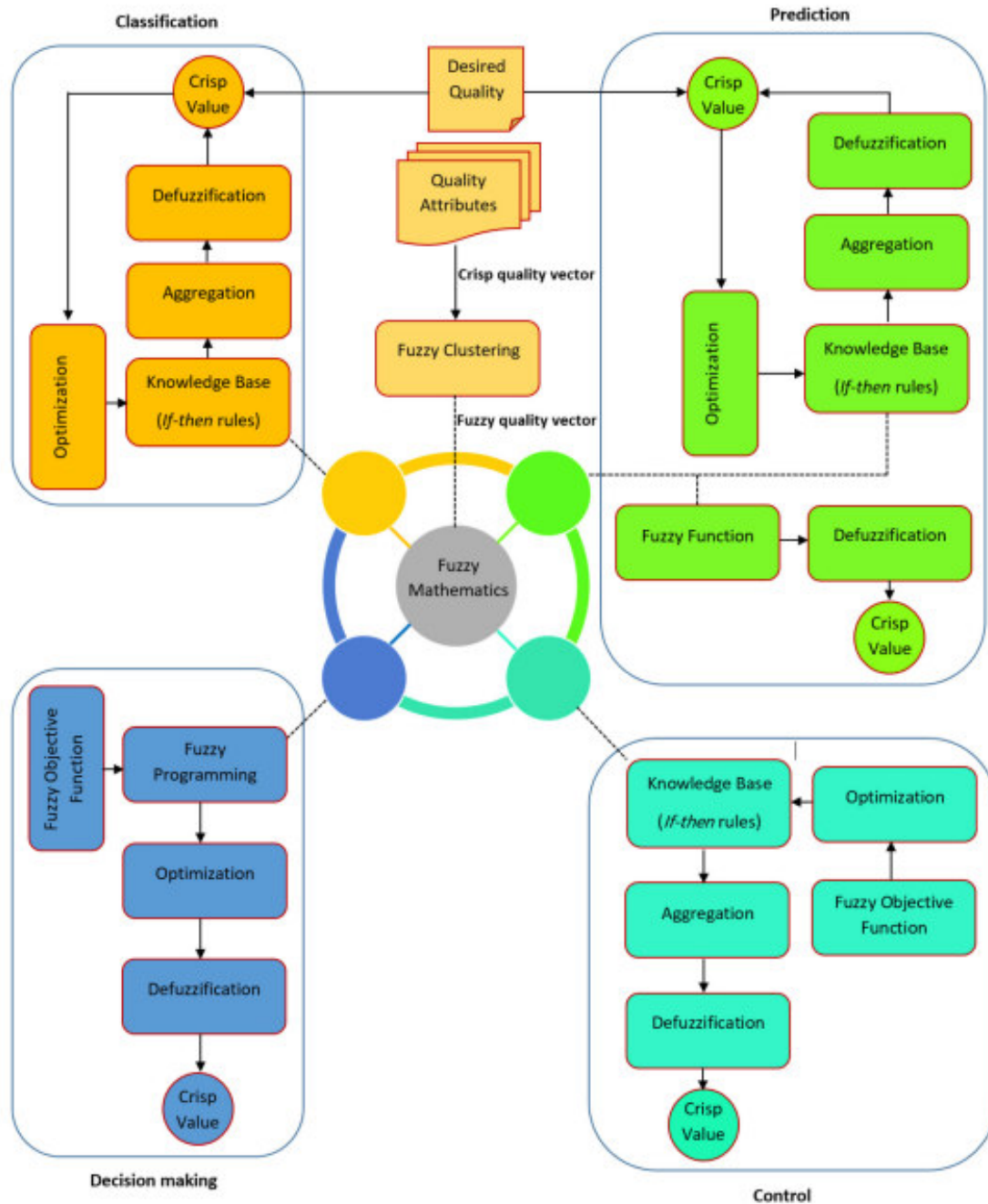


Рисунок 1.5 – Применение нечеткой логики в системах управления процессами обезвоживания

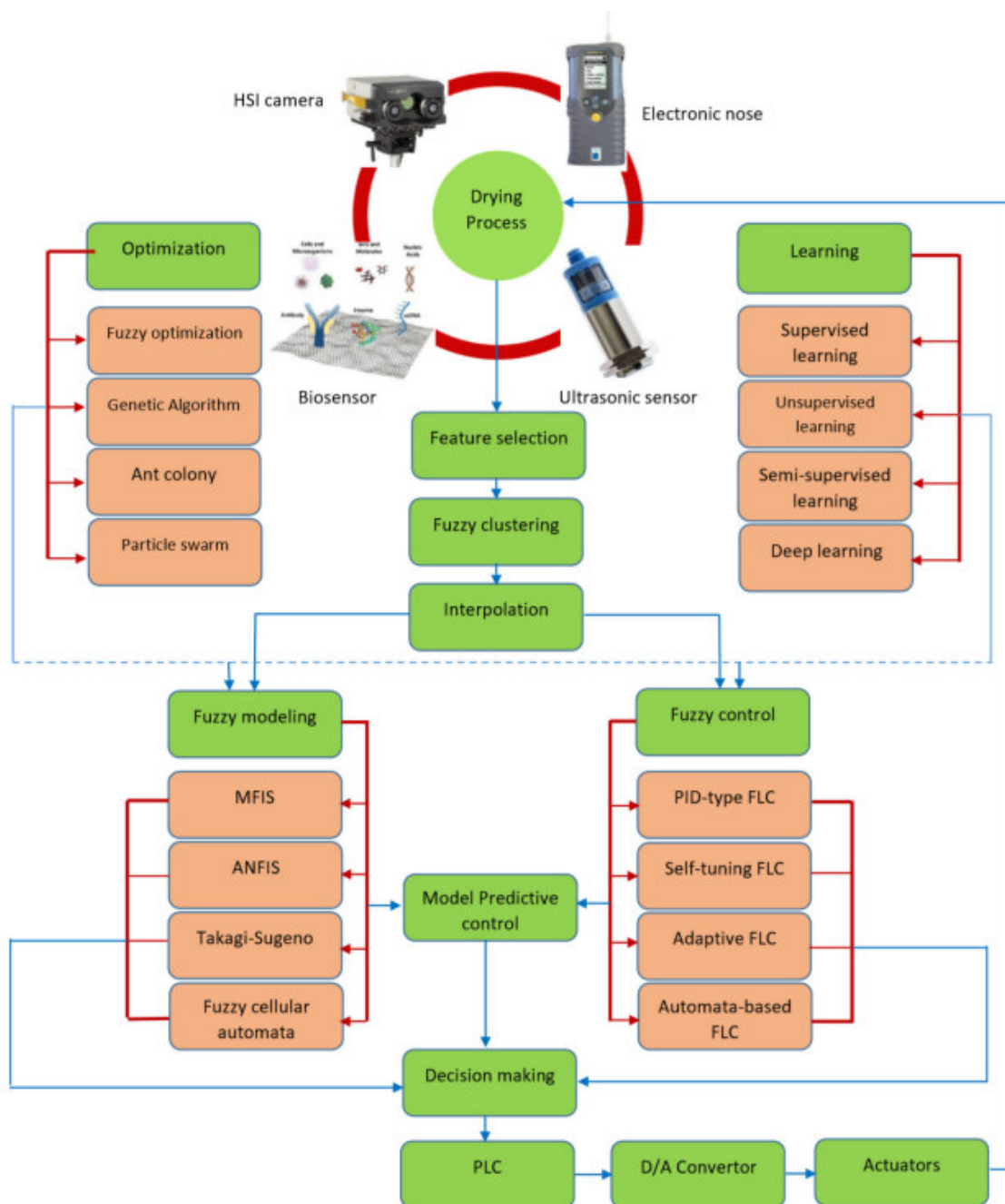


Рисунок 1.6 – Дорожная карта для будущих исследований нечеткой логики в технологии сушки

#### 1.4 Типовая система управления сушильной камерой

Важным параметром технологического процесса обезвоживания является поддержание заданной температуры внутри камеры сушки. Типовая схема управления сушильной камерой, представлена на рисунке 1.7. Как видно из

схемы, система получает текущее значение технологических параметров температуры и относительной влажности от датчиков. Затем система анализирует текущее состояние системы и выдает управляющие воздействия на блоки управления мощностью, выдаваемой на исполнительные механизмы, в роли которых выступают увлажнитель и нагреватель камеры. Также система управления обеспечивает регулирования скорости потока внутри камеры и выброса отработанного воздуха посредством рециркуляционных и вытяжных вентиляторов, которые подключены к частотным преобразователям.

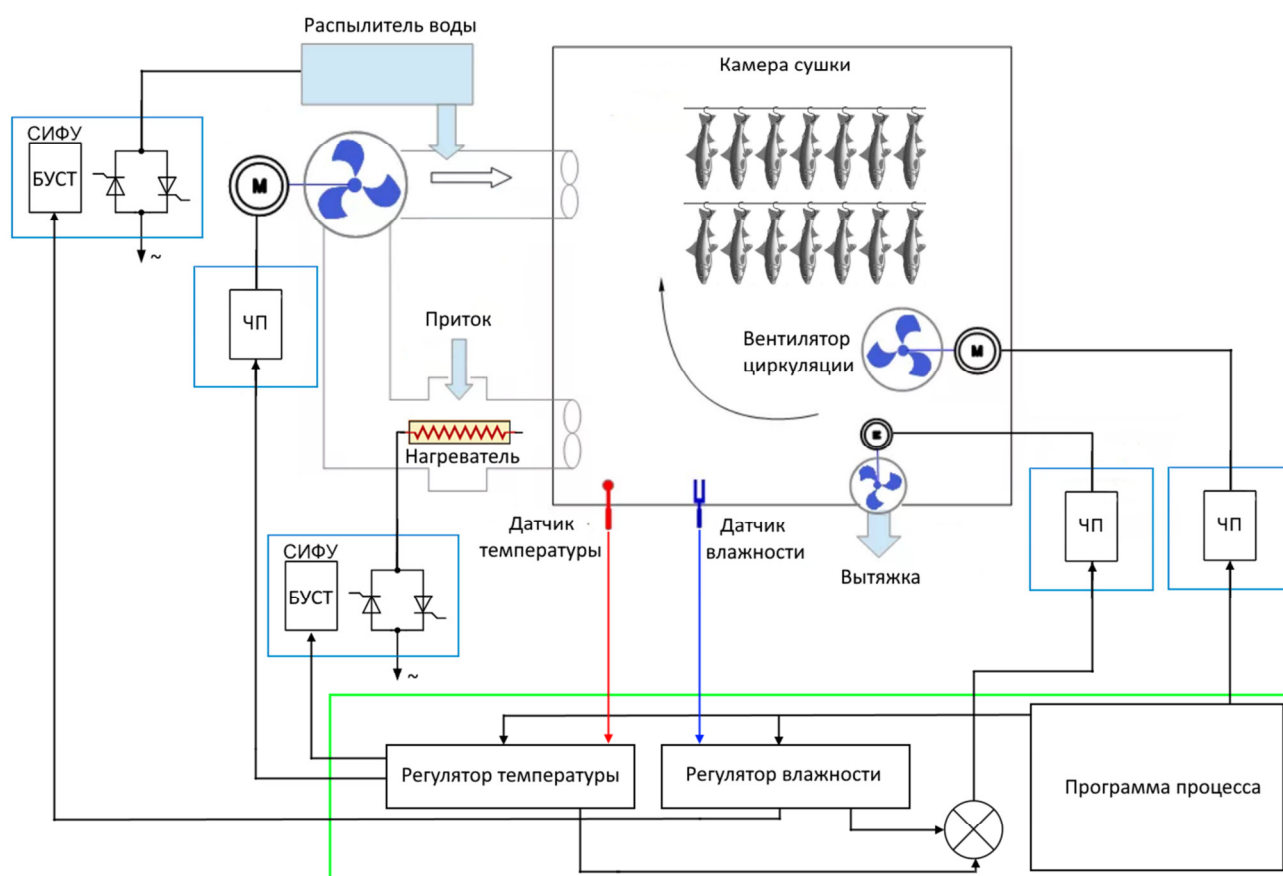


Рисунок 1.7 – Типовая схема управления сушильной камерой

На Российском рынке оборудования для систем автоматизации, на базе которого можно организовать системы управления сушильных установок, большое распространение получили такие фирмы как:

– «ОВЕН», является ведущим российским разработчиком и производителем контрольно-измерительных приборов, датчиков и средств автоматизации, выпускающая недорогое и качественное [36];

– НПК «РЭЛСИБ», предприятие из Новосибирска, которое предлагает большой выбор малогабаритных температурных датчиков, имеет обширную серию датчиков температуры и относительной влажности с выносными или встроенными чувствительными элементами, с местным или выносным микропроцессорным дисплеем. с токовым выходом, RS-485, с выходным релейно-симисторным устройством, приборы с беспроводной передачей данных. В этом направлении РЭЛСИБ обоснованно претендует на лидерство среди российских предприятий [46];

– КБ «АГАВА», сильная российская компания с богатейшим опытом работы, профессиональной командой специалистов. В ассортимент предприятия входят частотные преобразователи ERMAN и ERMANGIZER, контроллеры, модули ввода-вывода, панели оператора, регистраторы, программное обеспечение и прочее оборудование [37].

Современные сушильные установки, как правило, современным оборудованием и алгоритмами управления, которые обеспечивают эффективный процесс обезвоживания [14]. Использование передовых систем управления способствует оптимальному качеству продукции, повышению энергоэффективности и сокращению отходов.

Кроме того, современные сушильные установки могут включать в себя передовые системы управления данными, которые обеспечивают плавную интеграцию данных о сушке с другими производственными процессами и последующими операциями.

### **1.5 Постановка цели и задачи исследования**

Целью диссертационной работы является повышение энергоэффективности вследствие разработки и исследовании алгоритмов оптимального автоматического управления процессом холодной сушки гидробионтов.

Для достижения поставленной цели необходимо решить комплекс задач:

1. разработать программно-аппаратный комплекс поиска оптимальных режимов сушки сырья с возможностью создания условий протекания процессов и применением инновационных технологий.

а) разработать систему подготовки сушильного агента с заданными параметрами.

б) разработать элементы программно-аппаратного комплекса, такие как система тепловизионного анализа поверхности сырья, система мониторинга изменения массы и др.

в) разработать программное обеспечение для элементов программно-аппаратного комплекса и системы в целом.

г) составить математическое описание элементов программно-аппаратного комплекса и выполнить моделирование на ЭВМ.

д) выполнить эксперименты для получения характеристик объектов входящих в состав программно-аппаратного комплекса. Получить математические модели типа «вход-выход».

е) составить математическое описание системы управления и выполнить моделирование на ЭВМ. Выполнить синтез регулятора.

2. разработать и предложить способы автоматического управления процессом холодной сушки гидробионтов.

### **Выводы по 1 главе**

Российская рыбная отрасль имеет положительную динамику. Состояние рыбной отрасли России характеризуется переходом от производства непищевой рыбной продукции к производству пищевой рыбной продукции. Одним из перспективных направлений изготовления сушеных и вяленых рыбных продуктов. К 2030 году прогнозируется значительный рост производства различных видов сушено-вяленой рыбной продукции. Сегодня первоочередной задачей является разработка нового типа оборудования, систем автоматического управления, реализующих передовые методы обработки и интеллектуальных



датчиков, позволяющего повысить энергоэффективность технологических процессов и снизить затраты на производство.

В рамках главы был проведен анализ литературы, который показал, что в настоящий момент исследуются вопросы повышения энергоэффективности технологического процесса обезвоживания, разрабатываются новые способы обезвоживания и новое оборудование. Исследования в данной области проводятся учеными и исследователями в России и за рубежом учёных. Рассмотрены современные типовые системы управления сушильными установками и цифровые промышленные технологии, применяемые при автоматизации и цифровизации систем управления пищевыми технологическими процессами. В главе были поставлены задачи, которые необходимо решить в рамках диссертационной работы, для повышения энергоэффективности.

## ГЛАВА 2. Разработка программно-аппаратного комплекса поиска оптимальных режимов холодной сушки гидробионтов

### 2.1 Программно-целевая модель исследований

Программно-целевая модель исследований, включающая их обоснование, подготовку и проведение, а также реализацию результатов, приведена на рисунке 2.1.

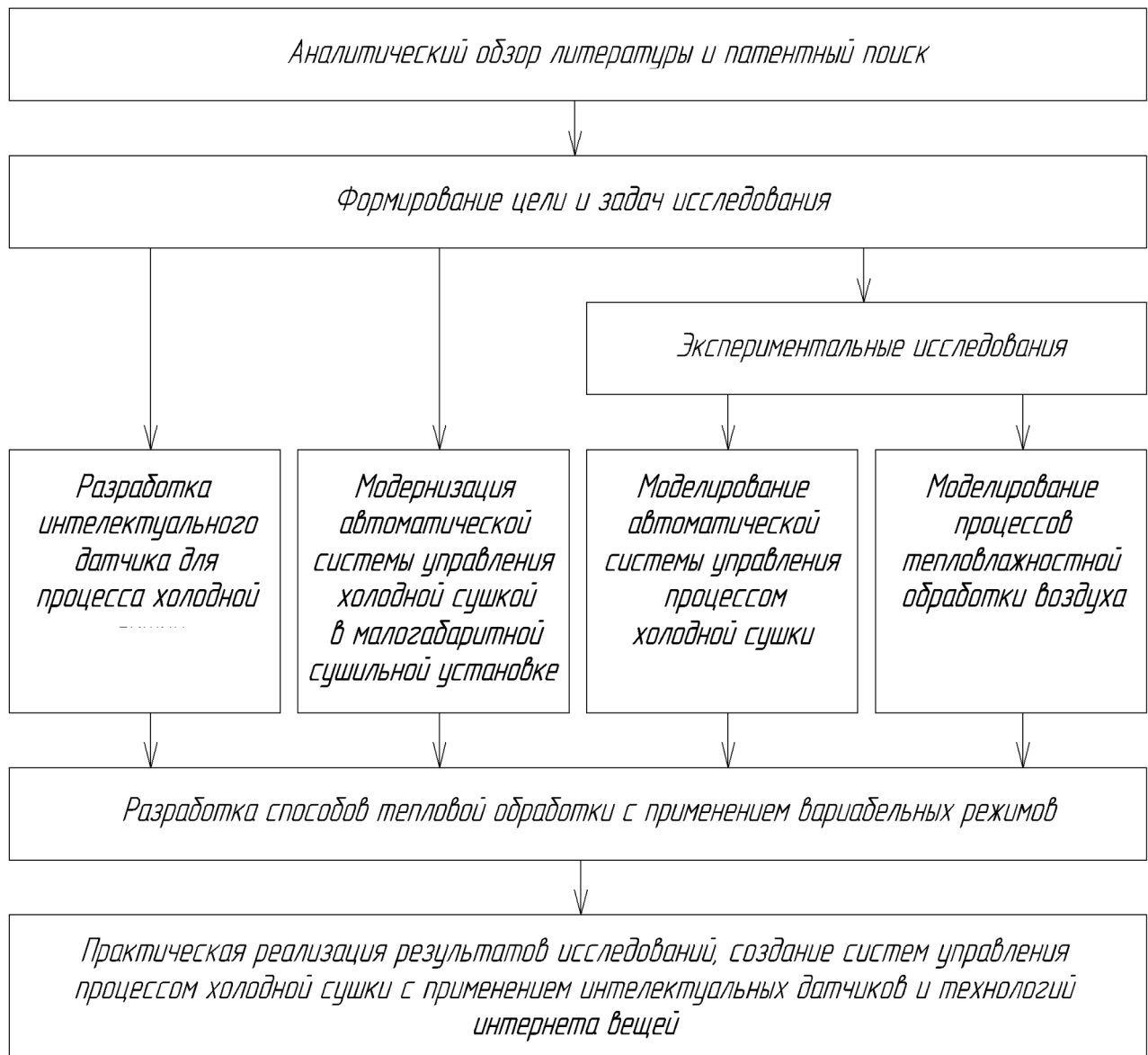


Рисунок 2.1 – Программно-целевая модель исследований

## 2.2 Объект исследования

Объектом исследования в настоящей работе является технологический процесс холодной сушки рыбы, а предметом оптимальное автоматическое управление процессом холодной сушки гидробионтов в промышленных установках с применением современных технологий.

В рамках данной работы было проведено исследование процесса холодной сушки, компонентов входящих в программно-аппаратный комплекс, таких как секция сушки и секция подготовки сушильного агента, были исследованы процессы тепловлажностной обработки сушильного агента, по данным исследований были получены соответствующие математические модели объектов и процессов. Также были проведены исследования по контролю температуры поверхности рыбы с применением системы технического зрения и тепловизионного анализа.

В результате исследований было предложено два варианта систем автоматического регулирования позволяющие добиться процесса обезвоживания рыбы с определённой энергоэффективностью технологического процесса. Первый, в котором объектом управления является температурно-влажностное поле, то есть воздействие на продукт осуществляется через температурно-влажностный режим внутри камеры сушки. Второй, в котором объектом управления является температура поверхности продукта.

Исследования процессов холодной сушки рыбы проводились на специально модернизированном программно-аппаратном комплексе. Разрабатываемые режимы на базе данного программно-аппаратного комплекса могут быть применены на промышленных сушильных установках.

### 2.3 Малогабаритная сушильная установка УПОР-М

Для исследования режимов обезвоживания рыбного сырья сотрудниками кафедры Автоматики и Вычислительной Техники и кафедры Пищевых производств в 2014 году была разработана малогабаритная сушильная установка УПОР-М, представленная на рисунке 2.2, которая находится на территории исследовательского цеха Мурманского Арктического Университета [44, 49, 62].



Рисунок 2.2 – Внешний вид установки для исследования режимов сушки сырья

В состав малогабаритной установки входят следующие элементы:

- четыре секции для проведения независимых экспериментов;
- рециркуляционный воздуховоды;
- рециркуляционный вентиляторы;
- вытяжные вентиляторы;
- нагревательные элементы;
- датчики температуры и относительной влажности в секциях;
- датчик температуры и относительной влажности окружающей среды.

Посредством задания параметров процесса сушки программно-аппаратный комплекс позволяет разрабатывать собственные режимы, а также

производить готовый продукт по одобренной программе процесса. В рамках работы над малогабаритной сушильной установкой, была доказана переносимость разрабатываемых режимов обезвоживания на промышленные установки.

Система управления сушильной установкой УПОР-М, схема которой представлена на рисунке 2.3, состоит из: программируемого логического контроллера ПЛК154, терморегулятора ТРМ148 фирмы «Овен», пяти датчиков температуры и относительной влажности ДВТ-03, четырех БУСТ, блоков управления вентиляторами вытяжки и рециркуляции, счетчиков электроэнергии Нива 103 и блока питания. Данная система управления представляет собой классическую систему управления температурой в секции, структурная схема которой представлена на рисунке 2.4

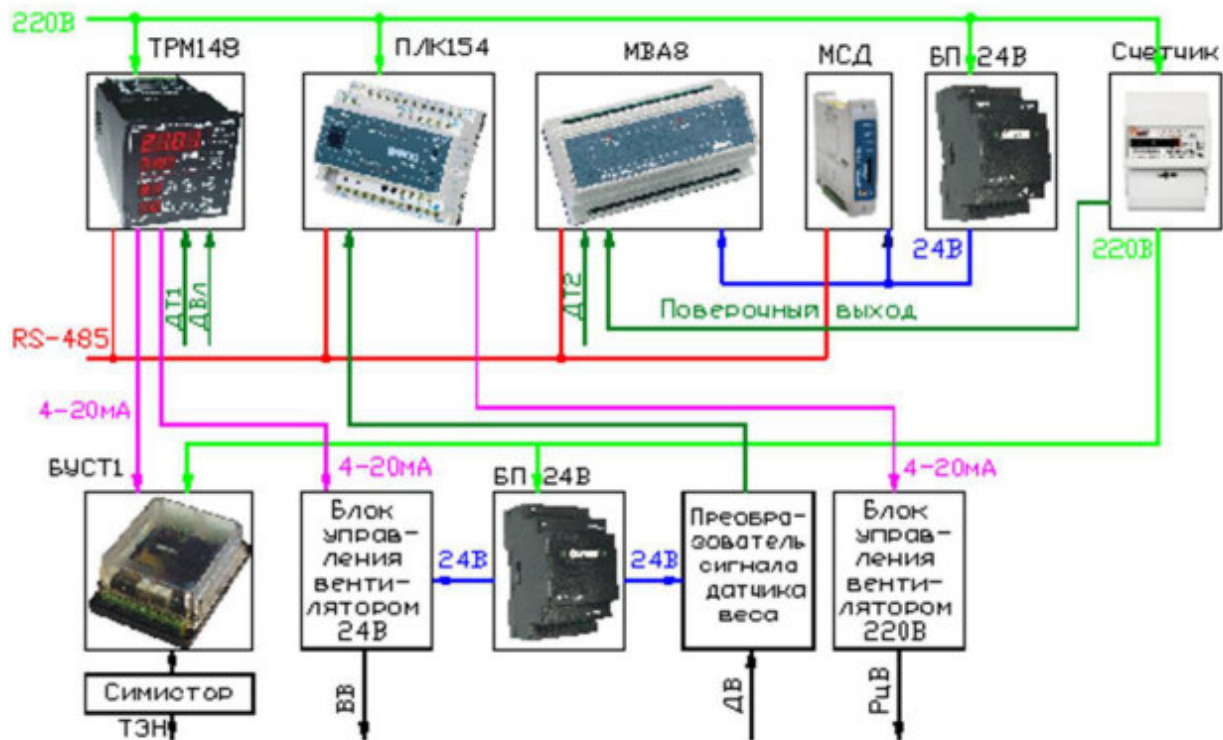


Рисунок 2.3 – Система управления УПОР-М

Сигналы с датчиков ДВТ-03 поступают на терморегулятор ТРМ148. Терморегулятор осуществляет регулирование температуры внутри каждой секции. В качестве регулирующего органа для управления температурой выступают трубчатые электронагреватели, исполнительными механизмами

являются четыре БУСТ с симисторами. Создание заданной скорости потока сушильного агента внутри секции, осуществляется регулированием частоты вращения рециркуляционного вентилятора непосредственно программируемым логическим контроллером с помощью блока управления вентилятором на 220В. Подсчет количества электроэнергии, затраченной на процесс, осуществляется однофазным счетчиком электроэнергии с дискретным выходом, подключенным к модулю ввода аналоговых сигналов ОВЕН МВА8. Все данные с датчиков обрабатываются программируемым логическим контроллером и записываются на карту памяти при помощи модуля сбора данных (МСД), дальнейшая обработка данных осуществляется на персональном компьютере.

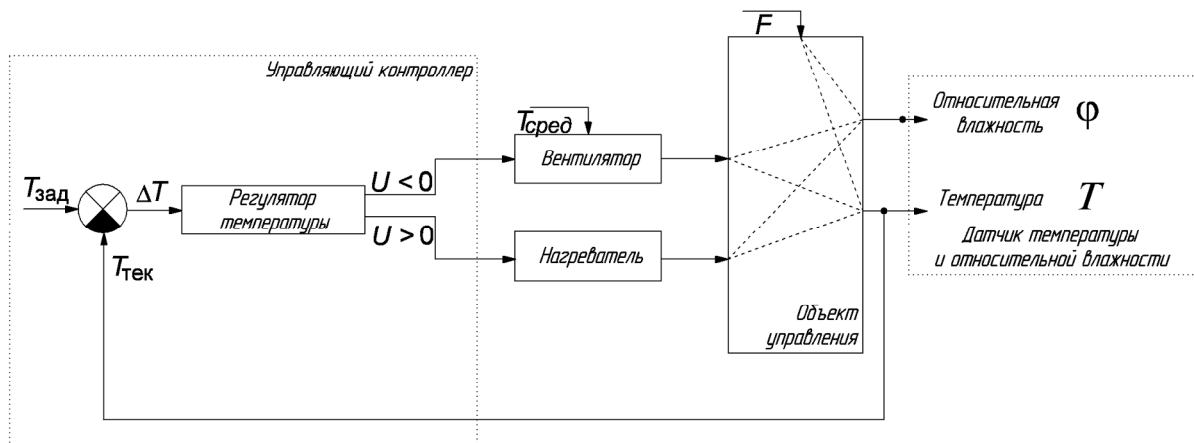


Рисунок 2.4 – Структурная схема системы управления температурой

Система управления программно-аппаратного комплекса реализует способ обезвоживания с линейно изменяющейся продолжительностью релаксации влаги в рыбе по температуре. При осуществлении данного способа длительность всего процесса разбивается на три участка, каждый из которых разбивается на интервалы с одинаковой продолжительностью, а период интервала разбивается на периоды сушки и релаксации.

Задания по температуре и скорости потока сушильного агента задаются через форму задания параметров технологического процесса программируемого логического контроллера ПЛК154. Программа управления сушильной установкой написана на языке программирования ST стандарта МЭК с использованием программного пакета «Codesys v2.3». На рисунке 2.5

представлена форма для задания параметров режима на одной из секций малогабаритной установки. Взаимодействие с интерфейсом производится на этапе конфигурирования параметров технологического процесса через среду «Codesys v2.3» и требует наличие персонального компьютера с соответствующим программным обеспечением и файлами проекта визуализации.

1 Секция			
Время участка	12	12	12
Температура	18	20	22
Поток РАБОТА	2	2	2
Поток РЕЛАК.	0.5	0.5	0.5
Период	4	3	2
R нач	0	15	30
R кон	10	30	30

РАБОТА/РЕЛАКСАЦИЯ

ПУСК

Рисунок 2.5 – Форма для задания параметров технологического процесса одной секции

Существующая малогабаритная сушильная установка обладает рядом недостатков:

- невозможность обеспечить повторяемость экспериментов для исследований из-за флуктуаций влажности цехового воздуха и отсутствием необходимых для стабилизации параметров регулирующих органов;
- невозможность задания в существующей системе тепловлажностного режима внутри камеры из-за отсутствия контура поддержания влажности;
- невозможность задания режимов с плавным изменением задания;
- отсутствие удобного интерфейса взаимодействия с установкой и доступа к нему;
- отсутствует возможность фиксировать начальную массу продукта и отслеживать динамику ее изменения в течение технологического процесса;

— использование для организации системы управления устаревших технологий, интерфейсов и протоколов.

## 2.4 Выбор программно-аппаратного обеспечения

Выбор аппаратного обеспечения для проведения экспериментов заключается в модернизации и дооснащения малогабаритной сушильной установки УПОР-М датчиками и исполнительными механизмами, на основе которых возможна реализация программно-аппаратного комплекса поиска оптимальных режимов, реализующего предлагаемые направления совершенствования процесса холодной сушки.

### 2.4.1 Разработка элементов для модернизации малогабаритной сушильной установки

Для обеспечения регулирования температуры сушильного агента в сторону повышения были изготовлены нагреватели на базе резисторов ПЭВ открытого и канального типа с защитой от перегрева на базе термореле, внешний вид которых представлен на рисунке 2.6.

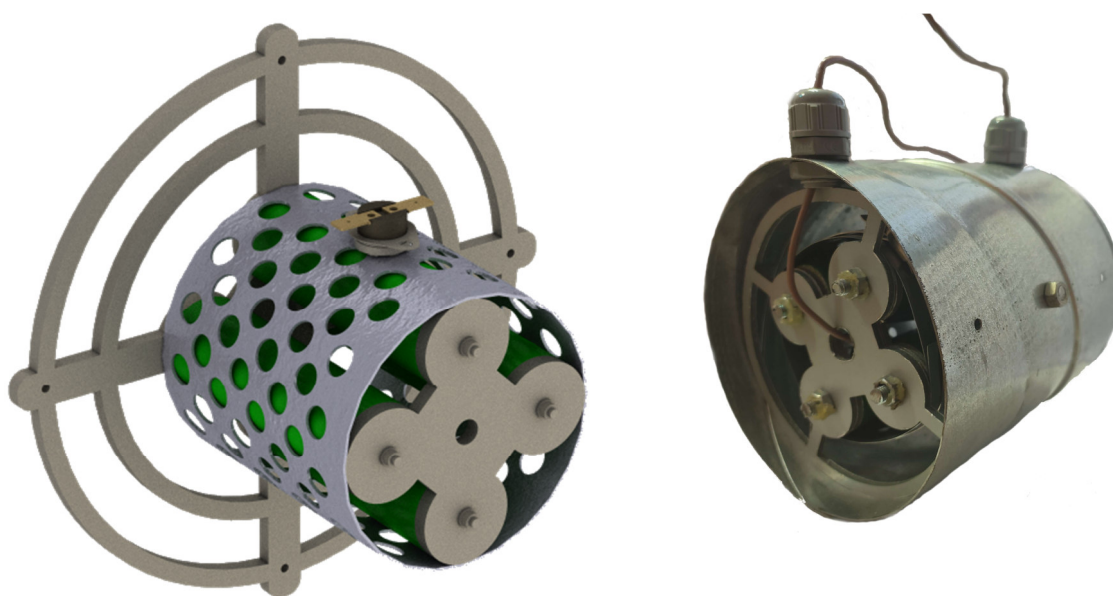


Рисунок 2.6 – Нагревательный элемент на базе резисторов ПЭВ открытого и канального типа



Для обеспечения регулирования влажности сушильного агента в сторону повышения, разработана конструкция генератора тумана на базе ультразвукового увлажнителя, поскольку ультразвуковые увлажнители являются наиболее производительными распылителями влаги. Генератор тумана состоит из емкости, ультразвукового распылителя влаги и вентилятора. Ультразвуковой распылитель закреплен на поплавке и погружен в воду на заданное расстояние. Поплавок размещается внутри контейнера. В крышке контейнера предусмотрены отверстия для установки воздуховодов и вентилятора. Внешний вид генератора тумана представлен на рисунке 2.7.



Рисунок 2.7 – Генератор тумана

Регулирование температуры и влажности в сторону понижения путем замещения объема воздуха работой вытяжных вентиляторов малоэффективна, поскольку замещение происходит цеховым воздухом, следовательно, невозможно понизить температуру и влажность воздуха внутри секции сушки ниже цеховой. Для устранения этого недостатка требуется предварительная подготовка сушильного агента. В качестве рабочего объема подготовки сушильного агента с минимальной температурой и влажностью была изготовлена соответствующая секция [33, 57, 60]. Внешний вид секции подготовки сушильного агента представлен на рисунке 2.8.

Конструкция секции подготовки изготовлена из панелей типа «сэндвич», трехслойной композиции (металл-теплоизоляция-металл). Внутренняя поверхность секции изготовлена из нержавеющей стали и покрыта краской, наружные поверхности секции изготовлены из оцинкованной стали. В состав секции входит осушитель, нагреватель, вентиляторы притока и вытяжки, а также датчик температуры и влажности ПВТ100.

Осушитель выполняет функции охлаждения и осушения подготавливаемого сушильного агента и представляет собой модернизированный бытовой кондиционер БК-2000. В рамках модернизации бытового кондиционера БК-2000 была изменена его конструкция, разработан рекуператор для возврата части тепловой энергии обратно в систему, улучшена теплоизоляция между секциями испарителя и конденсатора и предусмотрена возможность очистки радиаторов.

Нагреватель внутри секции выполняет функцию доведения температуры сушильного агента до заданной. Вытяжной вентилятор забирает подготовленный сушильный агент и подает на входы секций сушки. Вентилятор притока обеспечивает забор отработанного сушильного агента из секций сушки и возвращает его в секцию подготовки.

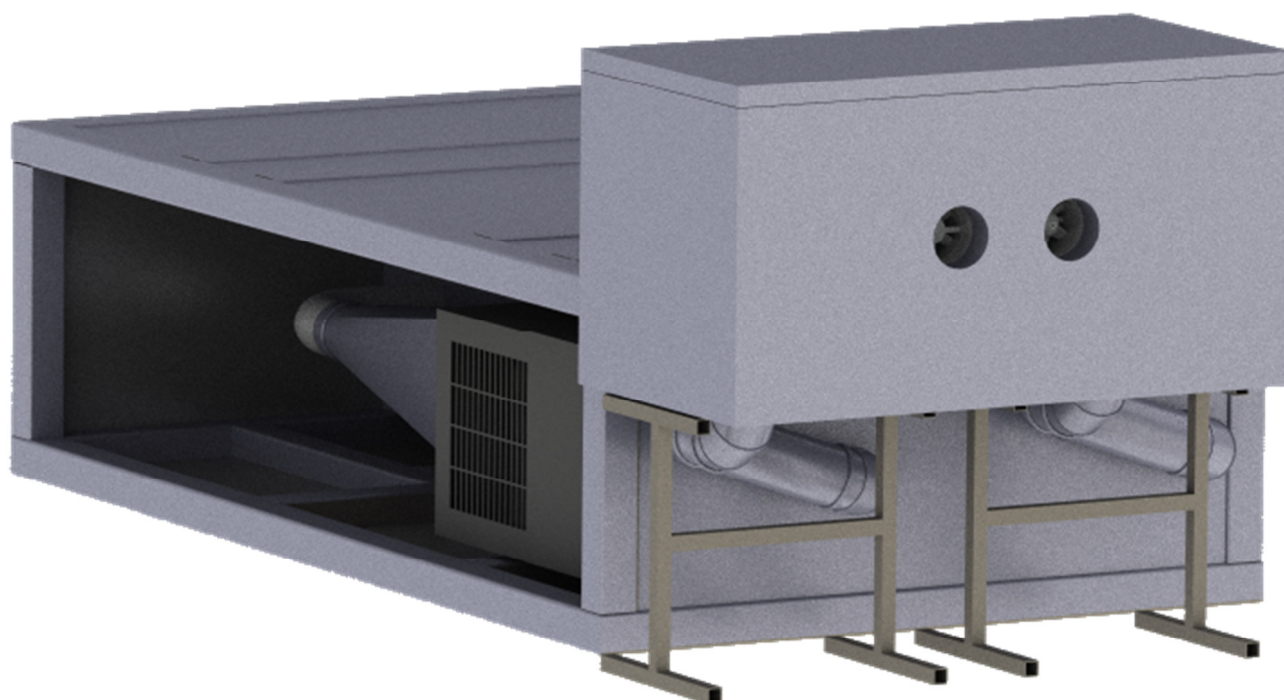


Рисунок 2.8 – Секция подготовки сушильного агента

Для обеспечения регулирования подаваемого (или удаляемого) объема воздуха была разработана автоматическая заслонка круглого сечения [25]. Модель заслонки, представленная на рисунке 2.9, была спроектирована в САПР T-Flex и изготовлена на 3D-принтере из ABS-пластика. Привод заслонки, состоит из сервомотора малой мощности SG90 и редуктора. Поскольку в конструкции сервомотора имеется встроенный потенциометр, который соединен с выходным валом и организует обратную связь по положению, заслонка не имеет дополнительных датчиков обратной связи. Минимальное положение сервомотора соответствует полному закрытию заслонки, а максимальное положение – полному открытию.



Рисунок 2.9 – Автоматическая заслонка круглого сечения

#### *2.4.2 Разработка формата передачи данных поверх протокола MQTT*

В настоящее время существует большое разнообразие протоколов и стандартов связи, используемых для организации взаимодействия вычислительных узлов [20, 63, 90]. Применимость того или иного стандарта или протокола зависит от многих факторов, таких как необходимая пропускная способность, дальность связи, устойчивость к помехам, безопасность и энергопотребление. С точки зрения практического использования сегодня

представляют интерес протоколы прикладного уровня, основанные на стеке протоколов TCP/IP (Transmission Control Protocol/Internet Protocol).

В рамках данной работы для организации взаимодействия между собой узлов программно-аппаратного комплекса было принято решение использовать промышленный протокол Message Queue Telemetry Transport (MQTT). Данный протокол является простым, компактным и открытым, предназначен для применения во встраиваемых системах и системах с ограничениями по пропускной способности канала связи. Позволяет организовывать системы Машинно-Машинного взаимодействия (M2M) и Промышленного Интернета вещей (IIoT). Работает на прикладном уровне модели OSI поверх TCP/IP.

Обмен данными осуществляется между клиентом (client), который может быть издателем (publisher), подписчиком (subscriber) сообщений или выполнять обе роли, и посредником, именуемый брокером (broker) сообщений. Издатель отправляет данные на брокер, указывая в сообщении определенный канал (topic), подписчики получают данные от множества издателей в зависимости от подписки на соответствующие каналы, а брокер координирует сообщения между разными клиентами (рисунок 2.10).

Протокол MQTT позволяет управлять приоритетом сообщений и гарантировать доставку данных, поддерживает три уровня качества обслуживания (QoS) при передаче данных. Уровень качества обслуживания (QoS) представляет собой соглашение между отправителем и получателем, которое определяет гарантию доставки данных. Уровень QoS 0 не гарантирует доставку данных брокеру, отправка данных осуществляется без подтверждения от брокера. Уровень QoS 1 гарантирует, что данные будут доставлены брокеру. Уровень QoS 2 гарантирует доставку данных подписчику.

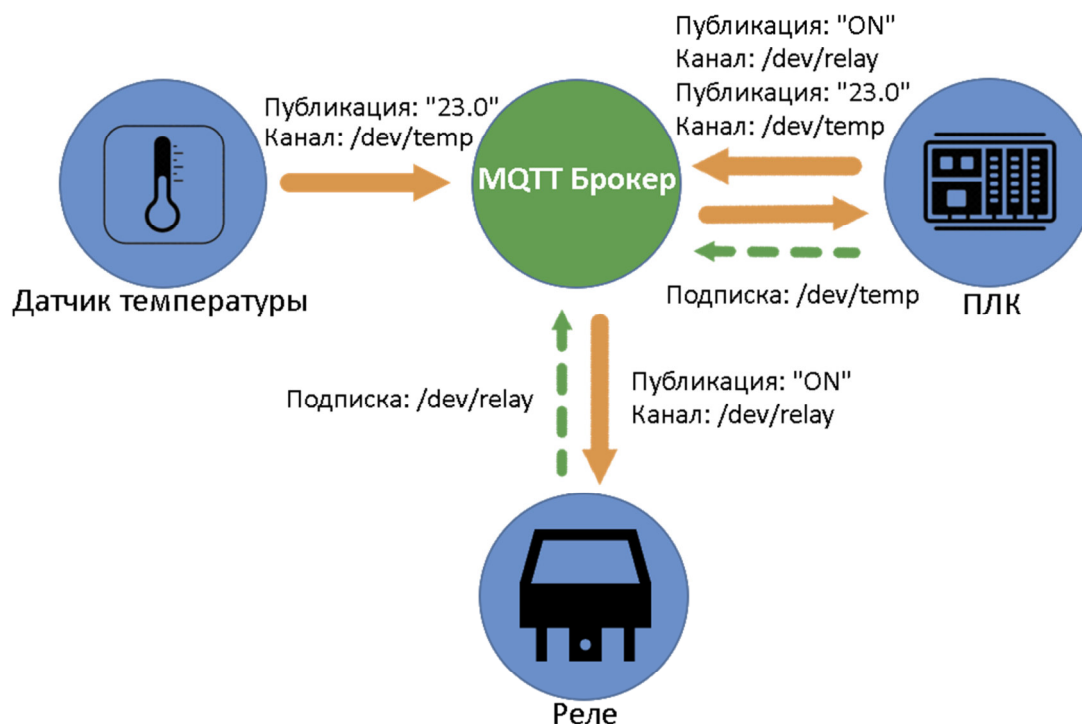


Рисунок 2.10 – Обмен данными по протоколу MQTT

Каналы имеют древовидную иерархическую структуру (рисунок 2.11) и представляют собой путь к данным в текстовом виде (используется кодировка utf8), где уровни веток логического дерева, разделяются символом слэша «/». Каналы гарантируют, что каждый клиент получает данные, предназначенные для него. Обработывая каналы как пути к данным, можно организовать фильтрацию сообщений на основе того, где — на каком уровне или в какой ветви — клиенты подписываются на путь к данным. Клиенты более высокого уровня могут получать каждое сообщение, в то время как клиенты более низкого уровня могут получать сообщения, относящиеся только к одному или двум базовым каналам, в нижней части иерархии.

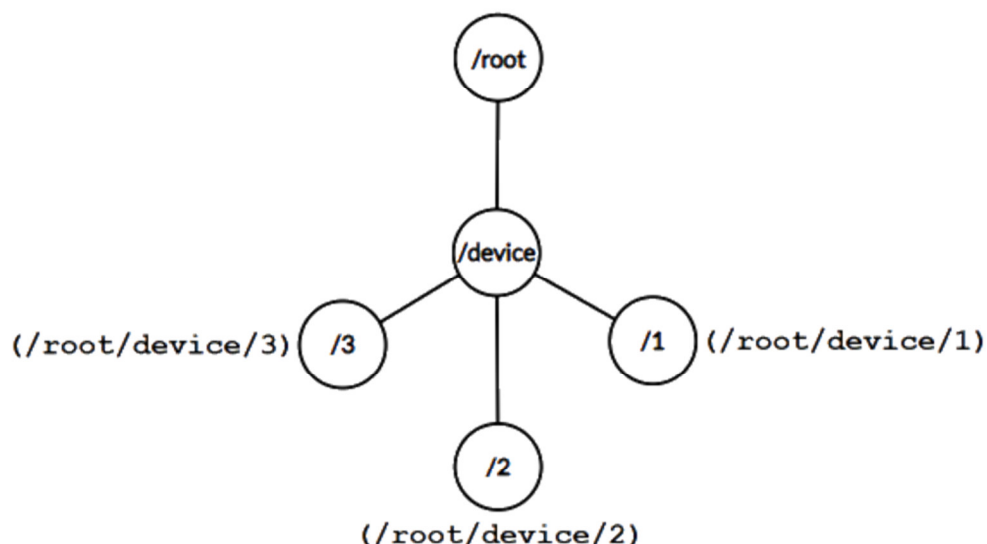


Рисунок 2.11 – Древоподобная иерархическая структура каналов

Любые данные, опубликованные или полученные клиентом, представлены в двоичном формате, это означает, что для получения исходного содержимого нужно интерпретировать сообщение. Содержимое сообщения может быть как текстовыми, так и двоичными данными [7, 35, 76].

Для преобразования из двоичной формы в текстовую достаточно знать стандарт числового кодирования текстовых символов (кодировку). Текстовая форма является простым и универсальным способом представления информации. В настоящее время для передачи информации в распределённых информационных системах применяются специализированные текстовые форматы. Наиболее распространёнными текстовыми форматами передачи данных, являются XML (Extensible Markup Language, расширяемый язык разметки) и JSON (JavaScript Object Notation, нотация объектов JavaScript).

Преимуществом текстовых форматов является прозрачная структура, которая может быть как независима от порядка расположения блоков информации, так и иметь строгую последовательность расположения блоков информации. Основным недостатком текстовых форматов является меньшая скорость преобразования данных во внутренний формат представления данных по сравнению с двоичными форматами.

Двоичные данные применяются для передачи нетекстовой информации и представлены во внутренней форме, в которой порядок следования блоков информации жёстко задан. По существу, двоичные данные являются аналогом структуры данных в памяти ЭВМ, отсюда возникает самый большой недостаток двоичных форматов, что если структура данных не описана, то интерпретировать её довольно трудно. Поскольку на разных платформах одни и те же типы данных могут иметь разные размеры, может быть различным порядок байт в слове или правила выравнивания. По этой причине в стандартах передачи двоичных форматов всегда оговаривается представление данных. При знании структуры двоичных данных практически не выполняется никаких дополнительных преобразований, что ускоряет процесс обработки данных.

Наиболее распространёнными двоичными форматами обмена данными, являются Protocol Buffers, Apache Thrift, Apache Avro. Данные форматы обеспечивают эффективную сериализацию с использованием схем описания структуры данных, а также поддерживают эволюцию схем, обеспечивая как обратную, так и прямую совместимость. Форматы MessagePack и Binary JSON (BSON) не используют схем описания, а имеют структуру ключ-значение, что даёт им преимущество в гибкости, однако, существенную часть от общего размера данных занимают ключи, что является их недостатком.

В работе предлагается использовать собственный двоичный формат BSON Transmission Format (BTF) передачи данных по протоколу MQTT. Формат представляет собой простую структуру и содержит заголовок, блок свойств, длину блока данных, блок данных и контрольную сумму. Заголовок представляет собой идентификатор (или ещё его называют магическим числом) являющийся строкой ASCII «bson» размерностью 4 байта и необходим для идентификации формата данных. За заголовком идет блок описания свойств размерностью 1 байт. Старший бит в байте описания свойств отвечает за вид двоичных данных. Если бит сброшен, то блок данных представлен в несжатом виде, иначе в сжатом. Остальные биты в параметре свойств зарезервированы и не используются в текущей версии формата. За блоком свойств идет длина блока

данных. Для хранения длины используется 32-разрядный беззнаковый тип (4 байта). Блок данных имеет произвольную длину и подразделяется на два вида, двоичные данные в сжатом виде и двоичные данные без сжатия. Блок сжатых двоичных данных состоит из длины исходных данных, для хранения которой используется 32-разрядный беззнаковый тип (4 байта), необходимой для распаковки данных и самих сжатых данных. Заканчивается формат контрольной суммой размерностью 4 байта, поскольку при передаче данных по сети необходимо учитывать ситуацию повреждения данных, а для систем автоматизации корректность данных имеет важное значение. Для проверки корректности данных был выбран алгоритм CRC-32, так как в сетевом формате необходима проверка корректности длинных и коротких последовательностей байт. На рисунке 2.12 приведена структура предлагаемого формата передачи данных.

идентификатор <code>(uint8_t [4])</code>
свойства <code>(uint8_t [1])</code>
длина блока данных <code>(uint32_t [1])</code>
блок данных <code>(uint8_t [N])</code>
контрольная сумма <code>(uint32_t [1])</code>

Рисунок 2.12 – Структура предлагаемого бинарного формата передачи данных

В качестве двоичного формата преобразования динамических структур данных в последовательность байтов (сериализацию) был выбран BSON. В работе использовалась библиотека «minibson» с лицензией MIT [111]. Данная библиотека представляет собой эффективную реализацию стандарта BSON в стиле Document Object Model (DOM), позволяющая создавать, обновлять и удалять данные на любом уровне структуры. Поддерживает типы данных double,



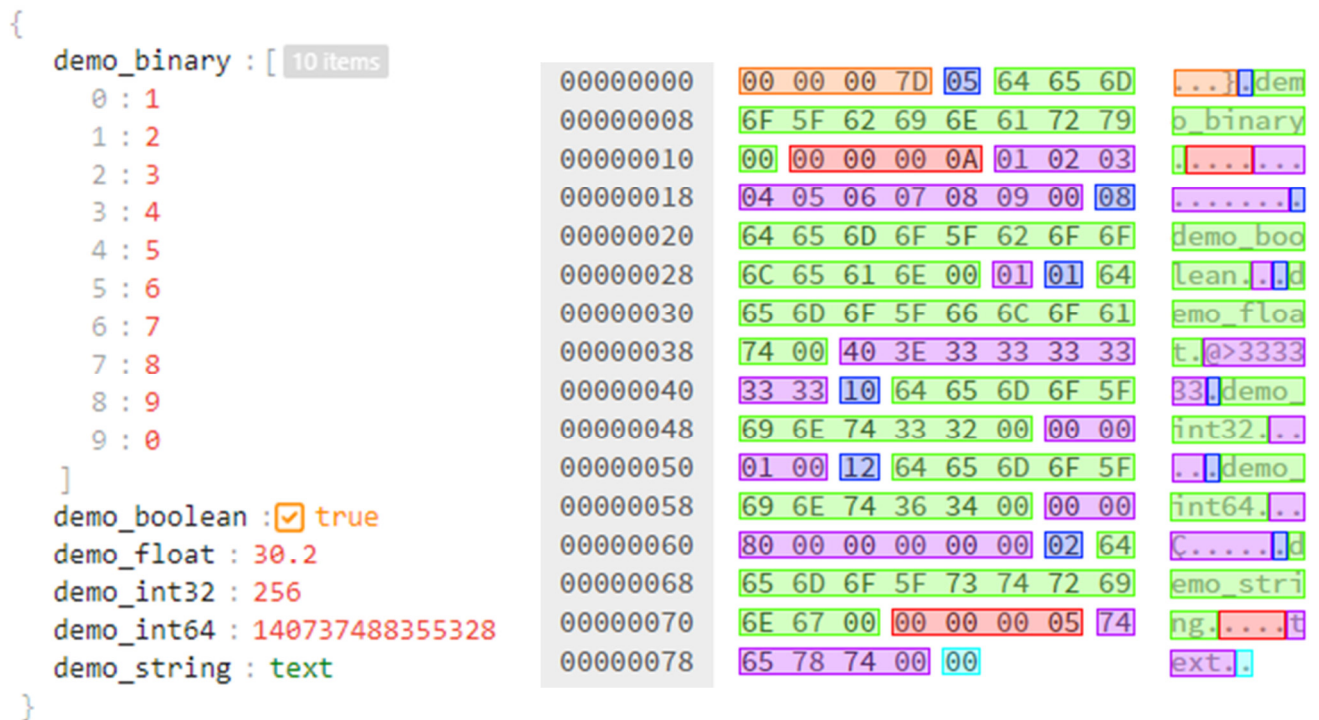
string, document, binary, boolean, null, 32-разрядные целочисленные и 64-разрядные целочисленные типы данных. В рамках работы данная библиотека была доработана, с целью соответствия требованиям передачи данных по сети. Это было необходимо для корректной интерпретации формата на Big-Endian (BE) / Little-Endian (LE) системах.

Для сжатия данных была выбрана библиотека «miniz» с лицензией MIT, являющаяся высокопроизводительной библиотекой сжатия данных без потерь, которая реализует стандарты спецификации формата сжатых данных zlib (RFC 1950) и Deflate (RFC 1951) [112]. Данная библиотека поддерживает наиболее часто используемые функции, экспортируемые библиотекой zlib, но является полностью независимой реализацией, поэтому требования к лицензированию zlib не применяются.

Рассмотрим кодирование заданной структуры данных, представленной на рисунке 2.13,а), в виде BSON-объекта. BSON-объект, размером 125 байт, в бинарном представлении и его текстовом виде представлен на рисунке 2.13,б). BSON-объект состоит из списка элементов. Каждый элемент состоит из типа, ключа и значения, рассмотрим более подробно. На рисунке 2.13,б) блок выделенный оранжевым цветом соответствует размеру BSON-объекта. Бирюзовым цветом выделен маркер конца объекта. Синим цветом выделены маркеры типа данных. Типы данных доступные в используемой реализации BSON представлены в таблице 2.1. За типом данных следует ключ, представляющий собой текстовую строку, на рисунке выделен зеленым цветом. Ключ заканчивается нулевым значением (0x00) после последнего допустимого символа в строке. После ключа следует значение, соответствующие данному ключу, на рисунке выделено сиреневым цветом. В зависимости от типа данных, перед значением может присутствовать блок длины, характерен для массивов и строк. Все числовые типы данных и размеры блоков данных в объекте используют формат Big-Endian.

Таблица 2.1 – Используемые типы данных в формате BSON

Тип данных	Размер	Маркер в BSON объекте	Описание
double	8 байт	0x01	число с плавающей запятой
string	N байт	0x02	строка
document	N байт	0x03	BSON-объект
binary	N байт	0x05	массив байтов
boolean	1 байт	0x08	булевы (True и False)
null	1 байт	0x0A	специальное значение
int32	4 байта	0x10	целое число
int64	8 байт	0x12	целое число



а)

б)

Рисунок 2.13 – Результат кодирования заданной структуры в BSON-объект

Рассмотрим кодирование BSON-объекта в виде предлагаемого формата BTF передачи данных. Результат кодирования в бинарном представлении и его

текстовый вид представлены на рисунке 2.14 без сжатия и 2.15 с применением сжатия.

На рисунке 2.14 оранжевым цветом выделен идентификатор формата BTF и равен магическому числу 0x62736f6e, представляющему собой строку ASCII «bson» размерностью 4 байта. Зеленым цветом выделен блок свойств и равен числу 0x00. Поскольку нулевой разряд этого числа равен нулю, то BSON-объект представлен в несжатом виде. Голубым цветом выделен блок, отвечающий за длину данных и равен числу 0x0000007d, что соответствует 125 байтам. Сиреневым цветом выделен блок, соответствующий несжатому BSON-объекту. Красным цветом выделена контрольная сумма CRC-32.

00000000	62 73 6F 6E 00 00 00 00	bson.....
00000008	7D 00 00 00 7D 05 64 65	{...}.de
00000010	6D 6F 5F 62 69 6E 61 72	mo_binar
00000018	79 00 00 00 00 0A 01 02	y.....
00000020	03 04 05 06 07 08 09 00	.....
00000028	08 64 65 6D 6F 5F 62 6F	.demo_bo
00000030	6F 6C 65 61 6E 00 01 01	olean...
00000038	64 65 6D 6F 5F 66 6C 6F	demo_flo
00000040	61 74 00 40 3E 33 33 33	at.>333
00000048	33 33 33 10 64 65 6D 6F	333.demo
00000050	5F 69 6E 74 33 32 00 00	_int32..
00000058	00 01 00 12 64 65 6D 6F	...demo
00000060	5F 69 6E 74 36 34 00 00	_int64..
00000068	00 80 00 00 00 00 00 02	.ç.....
00000070	64 65 6D 6F 5F 73 74 72	demo_str
00000078	69 6E 67 00 00 00 00 05	ing.....
00000080	74 65 78 74 00 00 10 4E	text...N
00000088	AE CF	«⌋

Рисунок 2.14 – Результат кодирования BSON-объекта в формате BTF без сжатия

На рисунке 2.15 оранжевым цветом выделен идентификатор и соответствует блоку на рисунке 2.14. Зеленым цветом выделен блок свойств и равен числу 0x01. Поскольку нулевой разряд этого числа равен единице, то BSON-объект представлен в сжатом виде. Голубым цветом выделен блок,

отвечающий за длину данных и равен числу 0x0000006b, что соответствует 107 байтам. Блок данных начинается с длины несжатых данных, необходимой для распаковки данных, на рисунке выделена желтым. Сиреневым цветом выделен блок, соответствующий сжато BSON-объекту. Красным цветом выделена контрольная сумма CRC-32. В результате кодирования BSON-объекта в формате VTF размер данных без сжатия составил 138 байт, а с сжатием 120 байт, что на 13 % меньше.

00000000	62 73 6F 6E 01 00 00 00	bson
00000008	6B 00 00 00 7D 78 01 35	kl...}x.5
00000010	8C 4D 0E 40 30 18 44 A7	TM.@0.D°
00000018	A8 BF 95 38 0A 62 29 6E	z7 ò8.b)n
00000020	22 15 25 4D 68 13 BE 05	".%Mh.↓.
00000028	0B 89 A3 6B 2B 66 F7 DE	.ëúk+f≈
00000030	64 06 C0 CD 27 B9 99 61	d.↳'↓Öa
00000038	54 5A EC 17 6C 72 16 84	TZ∞.lr.ä
00000040	11 8F 93 34 43 FA 55 C6	.Åô4C·Uf
00000048	AC 52 68 30 E6 71 5E 8D	%Rh0μq^i
00000050	20 F4 5D ED 53 78 A7 34	[]φSx°4
00000058	D5 95 DD 32 94 3F B7 8D	fo   2ö?↓i
00000060	E5 C7 1D 22 F0 EE A0 5D	σ f."≡εá]
00000068	E9 C5 31 27 79 12 F0 02	e+1'y.≡.
00000070	65 9C 1E 72 5A 3C 24 F2	ef.rZ<\$≥

Рисунок 2.15 – Результат кодирования BJSON-объекта в формате VTF с сжатием

Предлагаемый формат передачи является новым, а значит готовых решений в области оконечных устройств не существует и требуется их разработка. Наличие сегодня множества недорогих платформ разработки для проектирования встраиваемых систем позволяет решить эту проблему.

Поскольку во встраиваемых системах на размер передаваемых данных накладывается ограничение, а данные в формате VTF могут теоретически достигать 250 Мбайт (ограничение протокола MQTT) был разработан способ передачи VTF данных по частям.

Данный способ позволяет производить обмен пакетами данных, максимальная длина которых уникальна для конкретного устройства и не превышает 250 Мбайт. Пакет данных всегда начинается с идентификатора, который может принимать три значения: 0x00, 0x01 или 0x02. За ним следует длина блока данных и собственно байты данных. Для хранения длины используется 16-разрядный беззнаковый тип (2 байта). Завершает пакет контрольная сумма CRC-16. Для расчёта контрольной суммы используется полином 0x1021. Значение CRC-16 перед вычислением инициализируется числом 0xFFFF. Все числовые типы данных в пакете используют формат Big-Endian. Структура такого пакета представлена на рисунке 2.16.

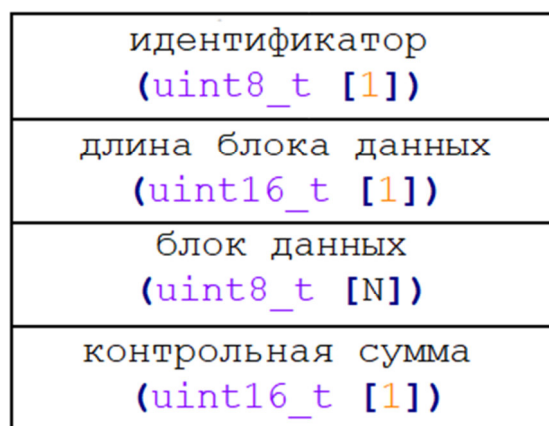


Рисунок 2.16 – Структура пакета для передачи данных по частям

В текущей реализации не используются маркеры начала и конца пакета, а также механизм байт-стаффинга, поскольку данные по MQTT приходят блоком данных, а не побайтно. Однако, если требуется передача полученных пакетов через информационный шлюз с последовательным каналом передачи, например MQTT/RS-232, их наличие в структуре пакета обязательно. В рамках данной работы такой случай не рассматривался.

Рассмотрим передачу данных в формате VTF по частям с использованием данного предлагаемого способа. Виды пакетов в бинарном представлении и их текстовый вид представлены на рисунке 2.17. На рисунке идентификатор выделен оранжевым цветом, размер блока данных голубым цветом, номер части желтым цветом, блок данных сиреневым цветом и контрольная сумма красным



цветом. Передача данных начинается с отправки пакета, идентификатор которого равен 0x00, размер блока данных равен 1 байту, а блок данных содержит байт 0x01. Данный пакет выступает в роли маркера начала передачи частей, вид такого пакета представлен на рисунке 2.17.а). За ним следуют пакеты, идентификатор которых равен 0x01, размер блока данных равен размеру части и ограничен допустимым размером платформы. Блок данных начинается с номера части, после которого идут данные части. Количество таких пакетов зависит от общего размера ВТФ данных и ограничений платформы. Пример такого пакета приведен на рисунке 2.17.б. Заканчивается передача отправкой пакета, идентификатор которого равен 0x02, размер блока данных равен 1 байту, а блок данных содержит байт 0x00. Данный пакет выступает в роли маркера конца передачи частей, вид такого пакета представлен на рисунке 2.17.в).

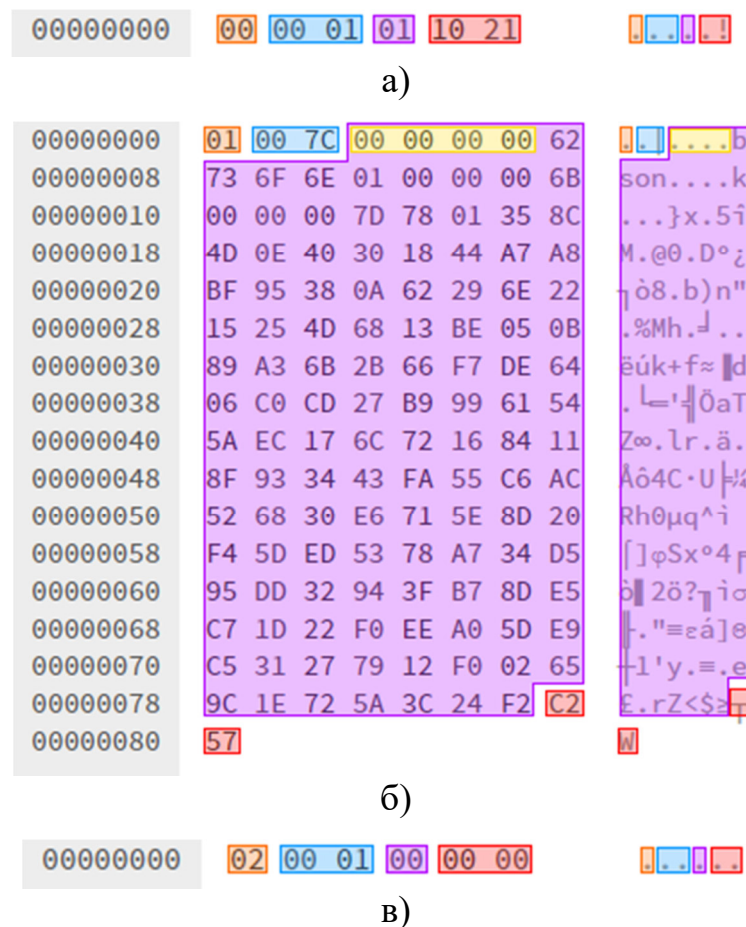


Рисунок 2.17 – Виды пакетов для передачи данных по частям в бинарном представлении

Использование в системах управления данного формата, требует разработки соответствующих оконечных устройств и программного обеспечения для них.

### 2.4.3 Разработка информационного шлюза для сопряжения оконечных устройств с системой управления по протоколу MQTT и форматом данных BTF

Поскольку оконечные устройства в рамках разрабатываемой системы должны управляться и обмениваться информацией по протоколу MQTT в формате BTF, было разработано устройство, предназначенное для преобразования и передачи данных с различных протоколов и интерфейсов в протокол MQTT и формат BTF. Структурная схема преобразователя представлена на рисунке 2.18.

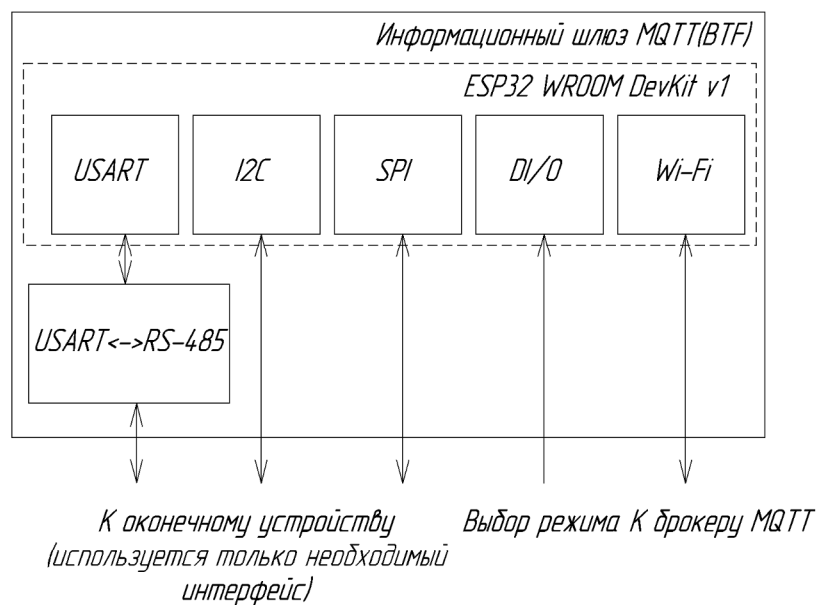


Рисунок 2.18 – Структура устройства для взаимодействия оконечных устройств с системой управления по протоколу MQTT в формате BTF

В основе данного устройства находится отладочная плата ESP32 WROOM DevKit v1 на модуле ESP32-WROOM с чипом ESP32-D0WDQ6 от Espressif. Через беспроводной интерфейс Wi-Fi организуется взаимодействие устройства с

системой управления по протоколу MQTT. Структура создаваемых устройством каналов представлена на рисунке 2.19 [100].

Устройство является одновременно издателем и подписчиком. Относительно базового канала, типа устройства, выбираемого на этапе конфигурации, и идентификатора устройства, в роли которого выступает MAC-адрес Wi-Fi модуля, формируются пути */set*, */get*, */stream* и */offline*. Путь */set* служит для установки заданий и настроек устройства, путь */get* для запросов на чтение текущих значений параметров, путь */stream* служит для информирования об активности устройства и передачи актуальных данных, а путь */offline* для информирования об отключении устройства.

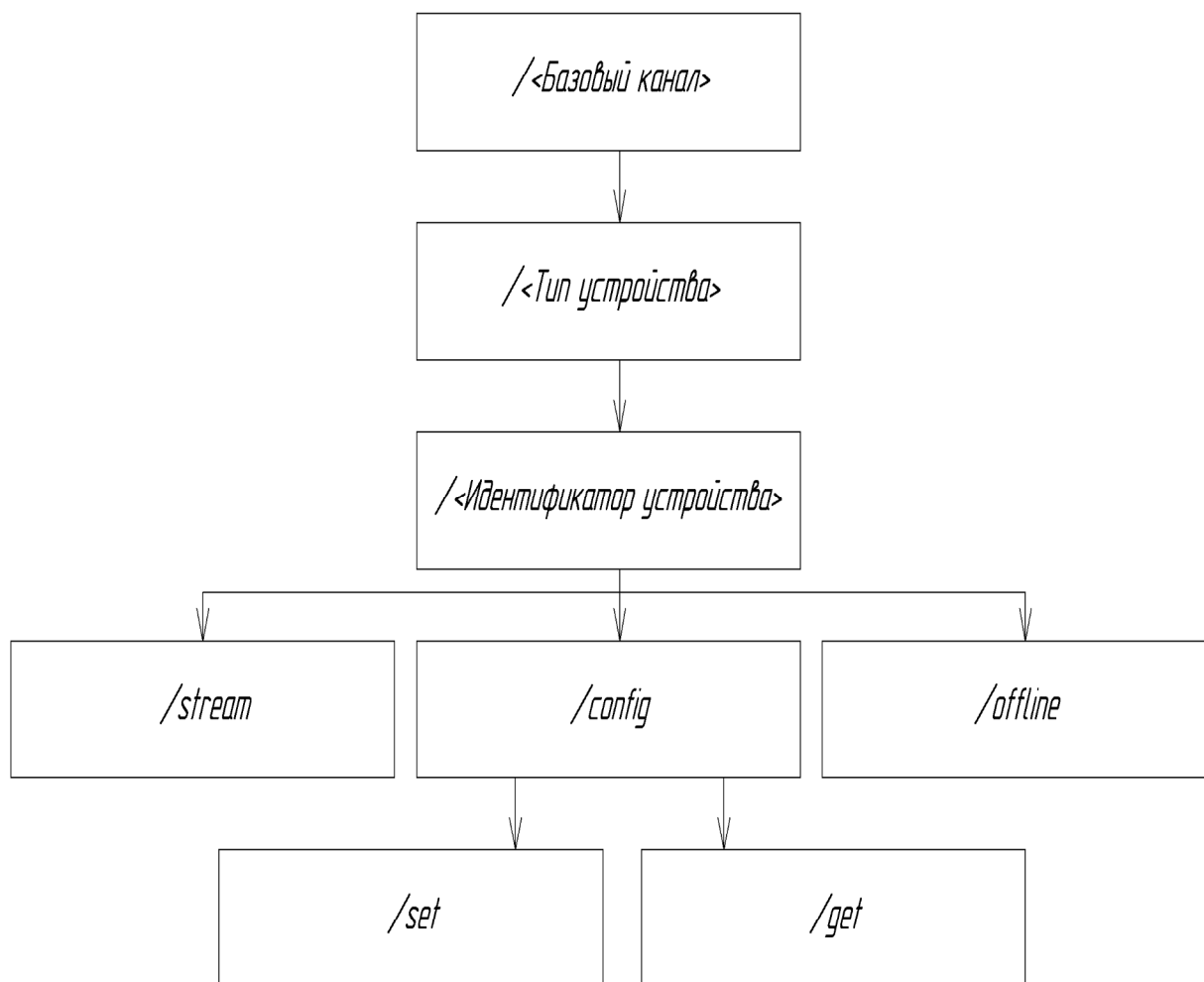


Рисунок 2.19 – Структура создаваемых устройством каналов



Для взаимодействия с управляющими платами оконечных устройств или другими модулями используется один из доступных интерфейсов: I<sub>2</sub>C, SPI, USART или RS-485. Устройство может работать в режиме конфигурирования или обмена данными. Выбор режима осуществляется соответствующим переключателем на плате устройства. В режиме конфигурирования устройство создает Wi-Fi точку, при подключении к которой открывается web-интерфейс конфигурирования, представленный на рисунке 2.20. Через данный интерфейс можно настроить сетевые параметры, параметры MQTT и выбрать шаблон подключенного модуля. В текущей реализации осуществлена поддержка 6 шаблонов модулей:

- шестнадцати канальный модуль управления заслонками;
- шестнадцати канальный регулятор мощности;
- восьми канальный модуль реле;
- модуль температуры и влажности восьми канальный;
- модуль весоизмерительный;
- модуль PZEM-016;
- модуль ПВТ100.

Шаблон подключаемого модуля к устройству содержит информацию об используемом интерфейсе и протоколе для взаимодействия с ним, правила взаимодействия по MQTT в формате VTF, а также тип модуля, что позволяет унифицировать информацию и команды для однотипных устройств, упрощая организацию системы управления. После конфигурирования, устройство перезагружается и переходит в режим обмена данными. В режиме обмена данными, взаимодействие с устройством осуществляется согласно выбранному шаблону.

The screenshot displays a web interface for configuring a device, divided into three main sections: Network (Сеть), Connected Device (Подключенное устройство), and MQTT. Each section contains specific configuration fields and a 'Apply Settings' (Применить настройки) button at the bottom.

Сеть	Подключенное устройство
<p>Настройки WiFi</p> <p>Имя точки доступа: DEHYDRATION</p> <p>Пароль: *****</p>	<p>Настройки подключенного устройства</p> <p>Шаблон устройства: модуль реле 8-ми</p>
<p>MQTT</p> <p>Настройки MQTT</p> <p>IP брокера: 192.168.0.190</p> <p>Порт: 1883</p> <p>Пользователь: </p> <p>Пароль: </p> <p>Базовый канал для данных: dehydration/system/</p>	

Применить настройки

Рисунок 2.20 – Web-интерфейс конфигурирования устройства

Большая часть модулей, поддержка которых реализована в устройстве, были разработаны на этапе модернизации малогабаритной сушильной установки. Устройство и правила взаимодействия с которыми будет рассмотрено ниже.

#### 2.4.4 Разработка модуля управления заслонками

Для управления заслонками малогабаритной сушильной установки был разработан модуль управления, структурная схема которого представлена на рисунке 2.21. Основой модуля является микроконтроллер Atmega328p, который получает задание угла открытия заслонки через интерфейс RS-485 по протоколу Modbus RTU. Задание угла открытия заслонки пересчитывается в необходимый угол положения сервомотора. Поскольку угол удержания сервомотора задается в виде ШИМ сигнала, в модуле используется специализированная микросхема PCA9685 представляющая собой шестнадцати канальный ШИМ-генератор.

Управление ШИМ-генератором осуществляется микроконтроллером по интерфейсу I<sub>2</sub>C. Так как заслонки находятся на удаленном расстоянии для передачи управляющего ШИМ сигнала используется дифференциальная линия, выполненная на двух микросхемах MAX485, одна выступает в роли передатчика, а другая в роли приемника. На стороне приемника принятый сигнал передается на вход сервомотора SG90, который отрабатывает задание по углу удержания, воздействуя через редуктор на положение заслонки.

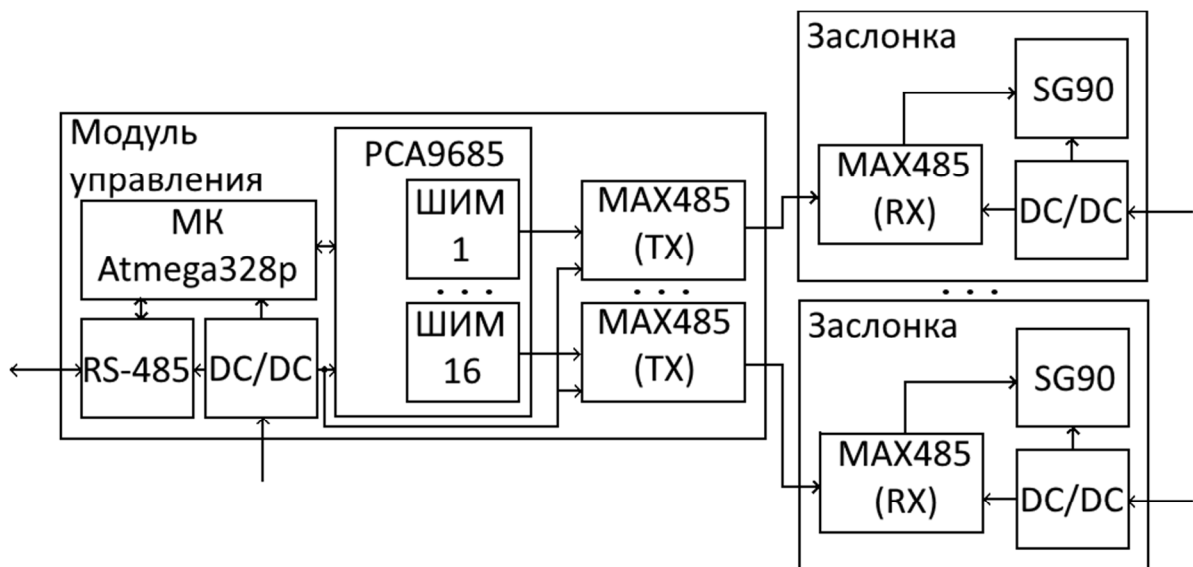


Рисунок 2.21 – Структурная схема шестнадцати канального модуля управления заслонками

Для взаимодействия с данным модулем через шлюз MQTT(BTF) был разработан шаблон. Устройству был присвоен тип «valve», разработана система команд, представленная в таблице 2.2. Шаблон содержит сетевые настройки по умолчанию для взаимодействия с данным модулем, поэтому система команд упрощена. Благодаря шаблону данные получаемые по MQTT в формате BTF через шлюз преобразуются в команды Modbus RTU и передаются устройству по интерфейсу RS-485. Данные, получаемые от устройства по протоколу Modbus RTU через интерфейс RS-485, преобразуются в формат BTF и передаются по протоколу MQTT в соответствующий канал.

Таблица 2.2 – Система команд и вид данных шаблона для модуля управления заслонками

Данные или команда в виде BSON-объекта	Описание
Канал: <Базовый канал>/valve/<Идентификатор>/config/set	
<pre> {"type" : "set", "parameter" : " channel_y", "value" : x} </pre>	<p>Установить положение заслонки у в х. Величина у находится в диапазоне от 1 до 16 и соответствует номеру заслонки, величина х от 0 до 100 и выражена в процентах.</p> <p>При принятии параметра устройство возвращает ответ {"type" : "response", "parameter" : " channel_y", "value" : x}</p>
Канал: <Базовый канал>/valve/<Идентификатор>/config/get	
<pre> {"type" : "get", "parameter" : " channel_y"} </pre>	<p>Получить текущее положение заслонки у. Ответ устройства {"type" : "response", "parameter" : "channel_y ", "value" : x}</p>
Канал: <Базовый канал>/valve/<Идентификатор>/stream	
<pre> {"type" : "stream", "value" : {"alive": x}} </pre>	<p>Отправляется устройством в канал для индикации активности. Значение х принимает значение 1 и 0 поочередно.</p>

#### 2.4.5 Разработка модуля управления симисторами

Использование промышленных блоков управления вентиляторами и нагревательными элементами в малогабаритной сушильной установке нецелесообразно по ряду причин:

- высокая стоимость оборудования;
- промышленные блоки используются для более мощных устройств, чем используются в малогабаритной сушильной установке;
- массогабаритные размеры.

Поэтому был разработан шестнадцати канальный блок управления силовыми симисторами, структурная схема которого представлена на рисунке 2.22. Данный блок построен на базе микроконтроллера Atmega328p и фазного регулятора К1182ПМ1Р. Микроконтроллер получает задание требуемой мощности в процентном выражении от номинальной через интерфейс RS-485 по протоколу Modbus RTU. Поскольку управление фазовым регулятором осуществляется ШИМ сигналом, полученное задание пересчитывается в процент заполнения ШИМ. После чего микроконтроллер через микросхему ШИМ генератора PCA9685 формирует соответствующий сигнал. Поскольку фазовый регулятор находится рядом с силовой частью, ШИМ сигнал усиливается по мощности микросхемой L293D. Для гальванической развязки силовой части и цепей управления используется оптопара АОТ128. Фазовый регулятор согласно полученному заданию управляет симистором ВТА16.

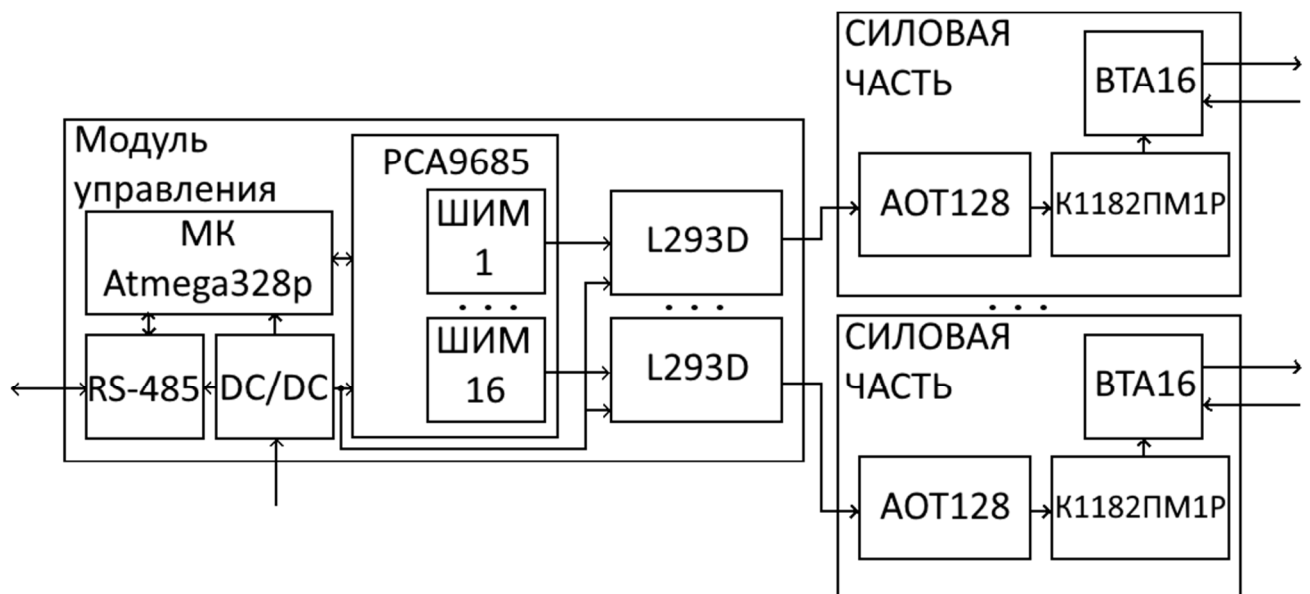


Рисунок 2.22 – Структурная схема шестнадцати канального модуля управления симисторами

Для взаимодействия с данным модулем через шлюз MQTT(BTF) также был разработан шаблон. Устройству был присвоен тип «power», разработана система команд, представленная в таблице 2.3.

Таблица 2.3 – Система команд и вид данных шаблона для модуля управления симисторами

Команда в виде BSON- объекта	Описание
Канал: <Базовый канал>/power/<Идентификатор>/config/set	
<code>{"type" : "set", "parameter" : "channel_y", "value" : x}</code>	Установить уровень мощности x в канале y. Величина y находится в диапазоне от 1 до 16 и соответствует номеру канала, величина x от 0 до 100 и выражена в процентах от номинальной мощности. При принятии параметра устройство возвращает ответ <code>{"type" : "response", "parameter" : "channel_y", "value" : x}</code>
Канал: <Базовый канал>/power/<Идентификатор>/config/get	
<code>{"type" : "get", "parameter" : "channel_y"}</code>	Получить текущий уровень выдаваемой мощности в канале y. Ответ устройства <code>{"type" : "response", "parameter" : "channel_y", "value" : x}</code>
Канал: <Базовый канал>/power/<Идентификатор>/stream	
<code>{"type" : "stream", "value" : {"alive": x}}</code>	Отправляется устройством в канал для индикации активности. Значение x принимает значение 1 и 0 поочередно.

### 2.4.6 Разработка модуля реле

Для управления пуском/остановом холодильной машины осушителя секции подготовки сушильного агента и генераторами тумана в секциях сушки был разработан восьмиканальный модуль реле, структурная схема которого представлена на рисунке 2.23. Данный модуль построен на базе микроконтроллера Atmega328p, который получает задание состояния релейных выходов через интерфейс RS-485 по протоколу Modbus RTU. Согласно заданию с дискретных выводов микроконтроллера подаются сигналы управления через усилитель по мощности на реле.

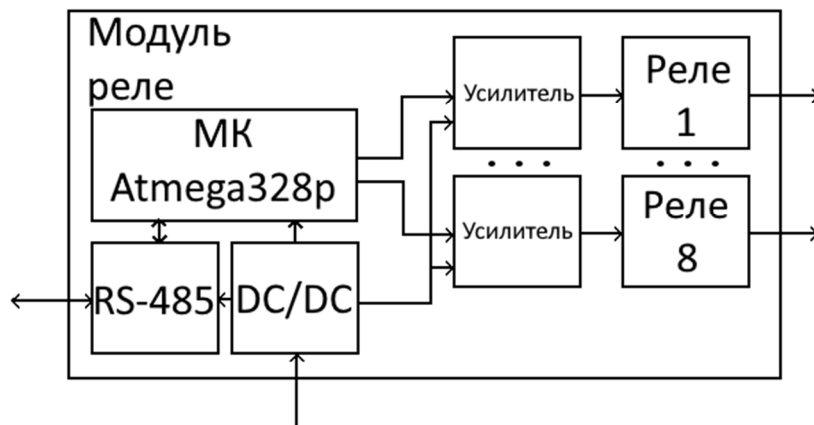


Рисунок 2.23 – Структурная схема восьмиканального модуля реле

В среде T-Flex для модуля был спроектирован корпус под DIN-рейку и изготовлен на 3D-принтере из ABS-пластика. Внешний вид разработанного корпуса представлен на рисунке 2.24.

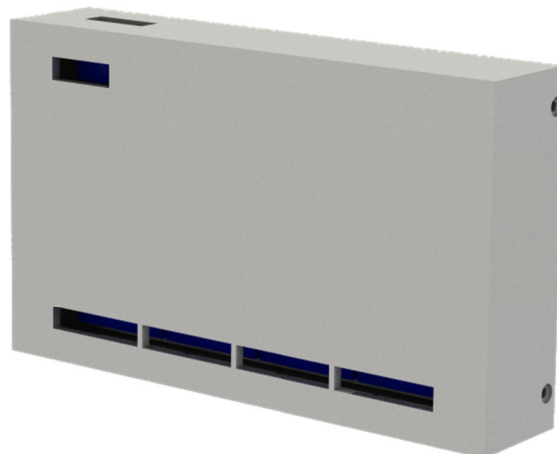


Рисунок 2.24 – Внешний вид восьмиканального модуля реле

Для взаимодействия с данным модулем через шлюз MQTT(BTF) также был разработан шаблон. Устройству был присвоен тип «relay», разработана система команд, представленная в таблице 2.4.

Таблица 2.4 – Система команд и вид данных шаблона для восьмиканального модуля реле

Команда в виде BSON- объекта	Описание
Канал: <Базовый канал>/relay/<Идентификатор>/config/set	
{"type" : "set", "parameter" : "channel_y", "value" : x}	<p>Установить состояние x в канале y. Величина y находится в диапазоне от 1 до 8 и соответствует номеру канала, величина x может быть 0 или 1 и соответствует состоянию реле.</p> <p>При принятии параметра устройство возвращает ответ {"type" : "response", "parameter" : "channel_y", "value" : x}</p>
Канал: <Базовый канал>/relay/<Идентификатор>/config/get	
{"type" : "get", "parameter" : "channel_y"}	<p>Получить текущее состояние реле в канале y. Ответ устройства {"type" : "response", "parameter" : "channel_y", "value" : x}</p>
Канал: <Базовый канал>/relay/<Идентификатор>/stream	
{"type" : "stream", "value" : {"alive": x}}	<p>Отправляется устройством в канал для индикации активности. Значение x принимает значение 1 и 0 поочередно.</p>



#### 2.4.7 Разработка системы сбора данных по температуре и относительной влажности

Для контроля технологических параметров температуры и относительной влажности были выбраны поверенные датчики ПВТ100. Датчики ПВТ100 были установлены по одному в каждой секции сушки, секции подготовки сушильного агента и один для измерения параметров внешней среды. Основные характеристики ПВТ100 представлены в таблице 2.5.

Таблица 2.5 – Характеристики ПВТ100

Характеристика	Значение
Диапазон измерений относительной влажности RH	от 0 до 100 % RH
Диапазон измерений температуры окружающего воздуха	от минус 40 до плюс 80 °С
Степень пылевлагозащиты	от минус 40 до плюс 120 °С
Температура измеряемой среды общепромышленное исполнение	IP65
Температура измеряемой среды высокотемпературное исполнение	от минус 40 до плюс 80 °С
Длина кабеля (модификации Н5)	от минус 40 до плюс 120 °С
Абсолютная погрешность измерения влажности	2,5 м / 5,0 м
Абсолютная погрешность измерения температуры	±3,0 % – в RH от 20 до 80 %
Повторяемость	±3,5 % – вне RH = 20...80 %
Стабильность	±0,5°С – в RH = 20...80 %
Время готовности к работе после включения, не более	±0,7 °С – вне RH = 20...80 %
Поддерживаемые интерфейсы и протоколы	±0,1 %RH / ±0,1 °С

Для взаимодействия с ПВТ100 через шлюз MQTT(BTF) был разработан шаблон. Устройству был присвоен тип «airprop», разработана система команд, представленная в таблице 2.6.

Таблица 2.6 – Система команд и вид данных шаблона для ПВТ100

Команда в виде BSON- объекта	Описание
Канал: <Базовый канал>/airprop/<Идентификатор>/stream	
<pre> {"type" : "stream", "value" : {"alive": x,   "data":{"temperature_1":y,     "humidity_1":z}} </pre>	Отправляется устройством в канал. Значение x принимает значение 1 и 0 поочередно и служит для индикации активности. Величины y и z соответствуют текущему значению измеренного параметра.

Для возможности получения температурно-влажностного поля внутри секций малогабаритной сушильной установки, был разработан модуль сбора данных по температуре и влажности на восемь точек контроля. В качестве датчиков температуры и относительной влажности используются SHT21. Основные характеристики SHT21 приведены в таблице 2.7. Структурная схема модуля сбора данных представлена на рисунке 2.25.

Таблица 2.7 – Характеристики SHT21

Наименование	Значение
Диапазон измеряемой влажности	от 0 до 100% RH
Нелинейность показаний	0,1 %
Точность при 25°C	2 %
Время отклика	8 с
Напряжение питания	3,3 В
Потребляемая мощность	1,5 мВт
Рабочая температура	от минус 40 до плюс 124

Выходной сигнал	I2C, ШИМ, SDM
-----------------	---------------

Данный модуль построен на базе микроконтроллера Atmega328p [24, 55]. Поскольку датчики SHT21 подключаются по интерфейсу I<sub>2</sub>C и имеют один фиксированный адрес, то к шине I<sub>2</sub>C можно подключить только один такой датчик. Поэтому в составе модуля используется микросхема TCA9548A, представляющая собой восьмиканальный мультиплексор шины I<sub>2</sub>C. Таким образом появляется возможность подключить до восьми датчиков. Микроконтроллер поочередно считывает данные с подключенных датчиков, переключая каналы мультиплексора. Передача текущих значений температуры и влажности с датчиков осуществляется через интерфейс RS-485 по протоколу Modbus RTU.

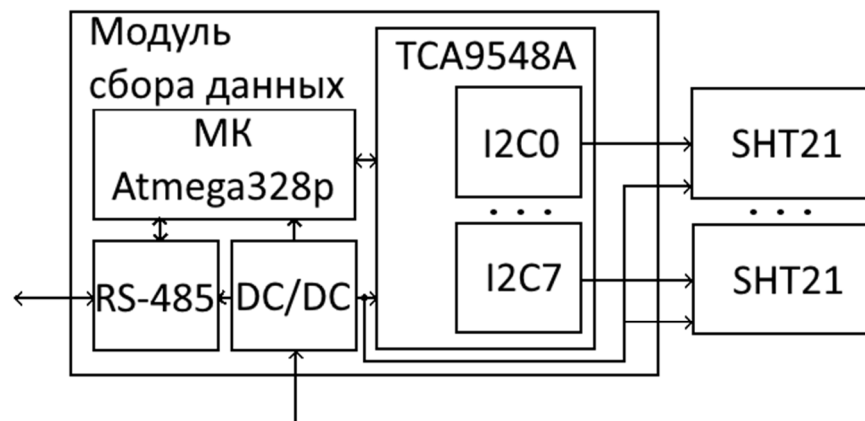


Рисунок 2.25 – Структурная схема модуля сбора данных

Для датчиков был разработан корпус, позволяющий разместить их внутри секций. Корпус был разработан в среде T-Flex и изготовлен на 3D-принтере из ABS-пластика. Внешний вид разработанного корпуса для датчика температуры и относительной влажности SHT21 представлен на рисунке 2.26. Основная плата модуля была разработана для размещения внутри стандартного корпуса под DIN-рейку D6MG. Внешний вид разработанного модуля сбора данных на восемь точек представлен на рисунке 2.27.



Рисунок 2.26 – Корпус для датчика температуры и влажности SHT21

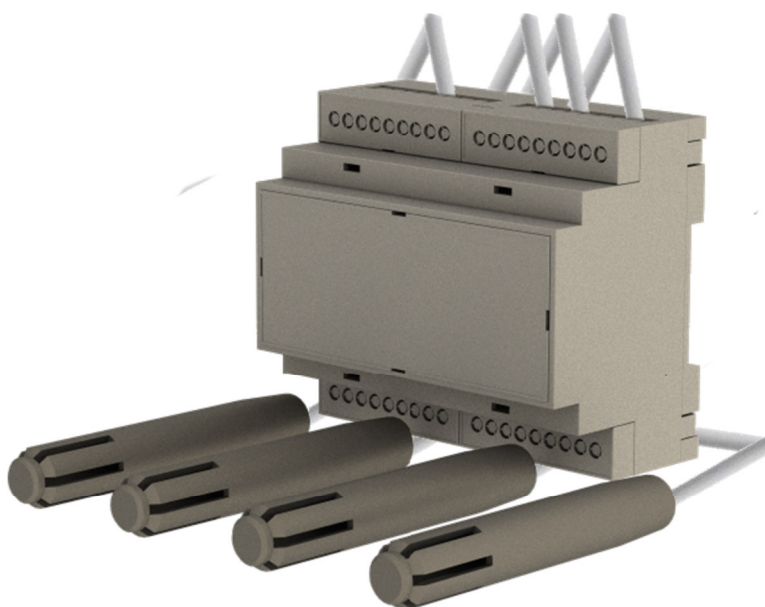


Рисунок 2.27 – Восьми канальный модуль сбора данных по температуре и относительной влажности

Для взаимодействия с модулем сбора данных через шлюз MQTT(BTF) был разработан шаблон. Устройству был присвоен тип «airprop», разработана система команд, представленная в таблице 2.8. Как видно из таблицы x, шаблон практически совпадает с шаблоном ПВТ100. Это было сделано специально, для унификации взаимодействия с однотипными устройствами.

Таблица 2.8 – Система команд и вид данных шаблона для модуля сбора данных

Команда в виде BSON- объекта	Описание
Канал: <Базовый канал>/airprop/<Идентификатор>/stream	
{"type" : "stream", "value" : {"alive": x,	Отправляется устройством в канал.

<pre>"data":{"temperature_w":y, "humidity_w":z}}</pre>	<p>Значение x принимает значение 1 и 0 поочередно и служит для индикации активности. Величины y и z соответствуют текущему значению измеренного параметра канала w.</p>
--	---

#### 2.4.8 Разработка массоизмерительной системы

В рамках модернизация сушильной установки было разработано устройство непрерывного контроля изменения массы продукта в процессе обезвоживания, предназначенное для расположения внутри секции сушки [59].

В среде T-Flex была спроектирована конструкция массоизмерительной системы, состоящая из крепления для тензодатчика, чаши, крепления конструкции для размещения внутри секции сушки и корпуса под управляющую плату. Тензометрический датчик и крепление к нему располагаются в верхней части секции сушки. Так как сырье подвешивается, воздействие на датчик осуществляться сверху вниз. Для фиксации тензодатчика были спроектированы верхнее и нижнее опорные крепления, конструкция которых обеспечивает деформацию при воздействии на тензодатчик строго по центру. С целью защиты тензодатчика от боковых воздействий и перемещений конструкция креплений имеет боковые стенки. Внешний вид креплений тензодатчика представлен на рисунке 2.28.



Рисунок 2.28 –Крепление тензометрического датчика

Чаша массоизмерительной системы представляет собой элемент, на который подвешивается сырье. Выполнена в виде каркаса прямоугольного параллелепипеда из квадратного профиля, в нижней части которого находятся крепления для максимально допустимого количества прутков, на которые подвешивается продукт. Такая конструкция чаши не препятствуют прохождению сушильного агента и позволяет ему равномерно проходить через продукт. Конструкция чаши массоизмерительной системы представлена на рисунке 2.29.



Рисунок 2.29—Чаша для подвешивания продукта

Для крепления массоизмерительной системы внутри секции сушки была разработана конструкция, которая также представляет собой каркас из квадратного профиля, соединяется с верхним креплением тензометрического датчика в своем геометрическом центре и устанавливается в направляющие находящиеся внутри секции сушки в верхней части. Благодаря креплению конструкция массоизмерительной систему может выдвигаться и задвигаться. Внешний вид крепления для расположения массоизмерительной системы внутри секции сушки представлен на рисунке 2.30.

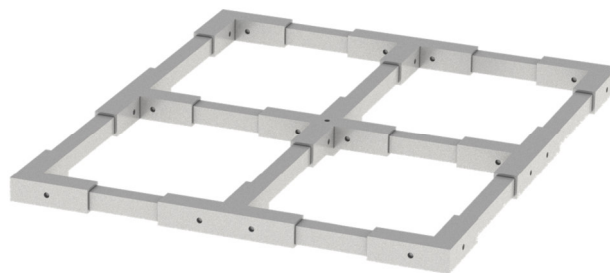


Рисунок 2.30 – Крепление массоизмерительной системы

С целью расположения управляющей платы рядом с тензометрическим датчиком, во избежание появления сильно искаженного сигнала и помех, для нее был разработан корпус. Корпус располагается на креплении массоизмерительной системы и имеет для этого специальный фиксатор. Внешний вид корпуса для управляющей платы представлен на рисунке 2.31. Внешний вид конструкции массоизмерительной системы и ее размещение внутри секции сушки представлено на рисунке 2.32.

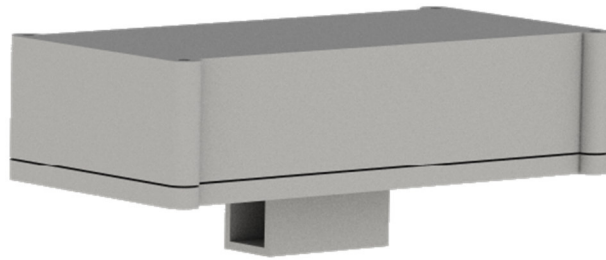


Рисунок 2.31 – Корпус для размещения управляющей платы на креплении

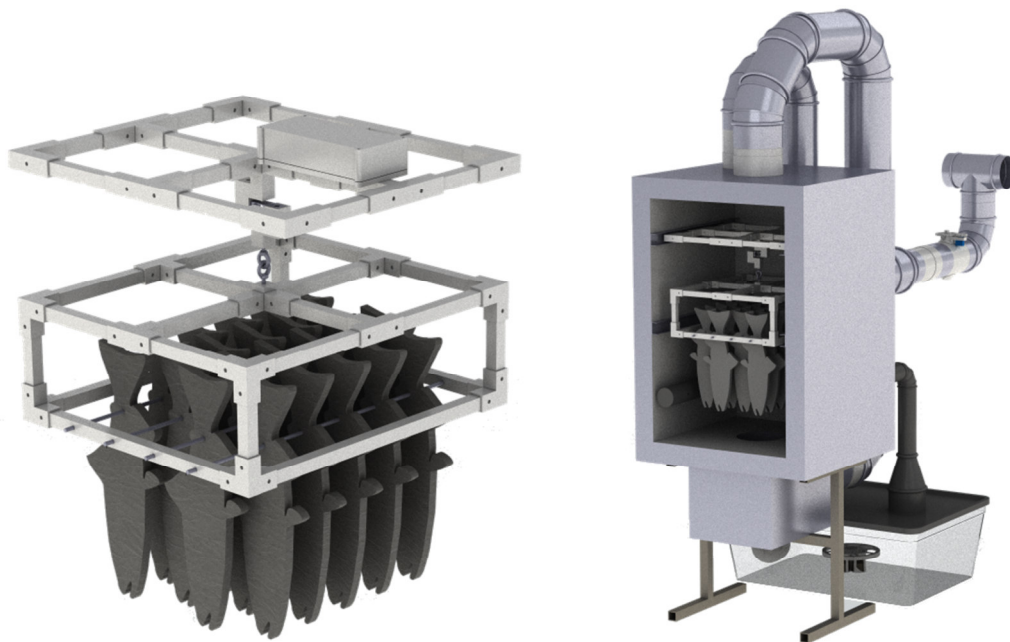


Рисунок 2.32 – Внешний вид конструкции массоизмерительной системы и ее размещение внутри секции сушки

В качестве материала для изготовления массоизмерительной системы был выбран ПВХ пластик, так как данный материал является недорогим, легким,

надежным, экологически безопасным, устойчивым к перепаду температур и воздействиям влаги.

Управляющая плата массоизмерительной системы, структурная схема которой представлена на рисунке 2.33, основана на микроконтроллере Atmega328p. Для измерения веса используются тензометрический датчик CZL-611CD с диапазоном измерения 0-5 кг. Считывание данных с тензодатчика осуществляется с помощью микросхемы НХ711 представляющей собой прецизионный 24-разрядный аналого-цифровой преобразователь, предназначенный для промышленных решений в области измерения веса. Получение текущего значения веса и управление процедурой тарирования осуществляется через интерфейс RS-485 по протоколу Modbus RTU.

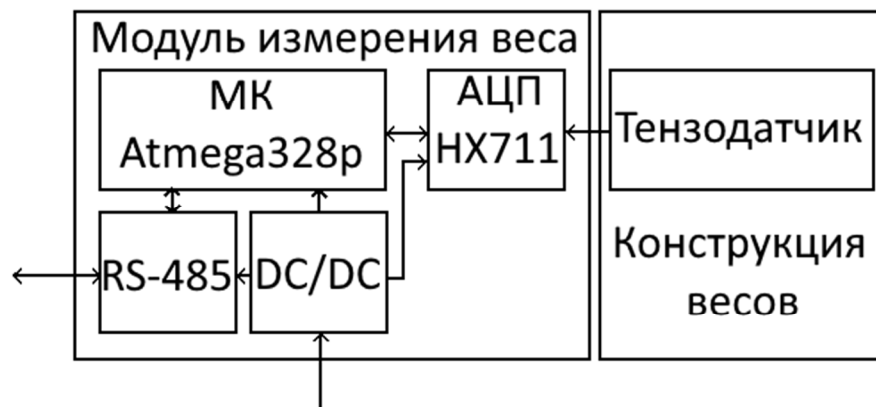


Рисунок 2.33 – Структурная схема массоизмерительной системы

Для взаимодействия с данным модулем через шлюз MQTT(BTF) также был разработан шаблон. Устройству был присвоен тип «weighscale», разработана система команд, представленная в таблице 2.9.

Таблица 2.9 – Система команд и вид данных шаблона для массоизмерительной системы

Команда в виде BSON- объекта	Описание
Канал: <Базовый канал>/weighscale/<Идентификатор>/config/set	
<pre>{ "type" : "set", "parameter" : "tare",   "value" : x }</pre>	Тарирование весов. Величина x может быть 1 и соответствует запросу процедуры тарирования.



	При принятии параметра устройство возвращает ответ {"type" : "response", "parameter" : "tare", "value" : x}
Канал: <Базовый канал>/weighscale/<Идентификатор>/stream	
{"type" : "stream", "value" : {"alive": x, "data": {"weigh_1":y}}}	Отправляется устройством в канал. Для индикации активности значение x принимает значение 1 и 0 поочередно. Величина у является измеренным значением веса.

#### 2.4.9 Выбор оборудования для измерения потребляемой мощности

Для оценки энергоэффективности разрабатываемых режимов требуется определение количества электроэнергии, потребляемой установкой. В качестве устройства учета электроэнергии был выбран счетчик Peasefair PZEM-016, основные характеристики которого представлены в таблице 2.10, а внешний вид представлен на рисунке 2.34. Устройство имеет интерфейс RS-485 и поддерживает протокол Modbus RTU.

Таблица 2.10 – Основные характеристики счетчика Peasefair PZEM-016

Характеристика	Описание
Тип измеряемого параметра	переменный ток, переменное напряжения (АС)
Диапазон измерения тока	от 0,02 до 100,0 А
Разрешение измерения тока	0,001 А
Точность измерения тока	0,5%
Диапазон измерения напряжения	от 80 до 260 В
Разрешение измерения напряжения	0,1 В
Точность измерения напряжения	0,5%
Диапазон мощности	от 0 до 23 кВт

Разрешение измерения мощности	0,1 Вт
Точность измерения мощности	0,5%
Коэффициент мощности	от 0,00 до 1,00
Разрешение измерения	0,01
Точность измерения	1%
Диапазон энергии	от 0 до 9999 кВт·ч
Разрешение измерения энергии	1 Вт·ч
Точность измерения энергии	0.5%
Диапазон частоты	от 45Гц до 65Гц
Разрешение измерения частоты	0,1 Гц
Точность измерения частоты	0,5%



Рисунок 2.34 – Внешний вид счетчика Peasefair PZEM-016

Для взаимодействия с PZEM-016 через шлюз MQTT(BTF) был разработан шаблон. Устройству был присвоен тип «energymeter», разработана система команд, представленная в таблице 2.11.

Таблица 2.11 – Система команд и вид данных шаблона для ПВТ100

Команда в виде BSON- объекта	Описание
Канал: <Базовый канал>/ energymeter/<Идентификатор>/stream	
{"type" : "stream", "value" : {"alive": x,	Отправляется устройством в канал.

<pre>"data": {"voltage_1" : y, "amperage_1" : y, "power_1" : y, "energy_1" : y, "frequency_1" : y, "cosphi_1" : y}}</pre>	Значение x принимает значение 1 и 0 поочередно и служит для индикации активности. Величины y соответствуют текущему значению измеренного параметра.
---	---

#### 2.4.10 Разработка системы тепловизионного контроля поверхности продукта

Для анализа температуры поверхности сырья было разработано устройство для непрерывного бесконтактного измерения температуры на основе тепловизионной матрицы [10, 11, 50, 125]. Устройство выполнено в формате модульного оборудования под DIN-рейку и предназначено для установки в сушильных секциях. Структурная схема устройства представлена на рисунке 2.35.

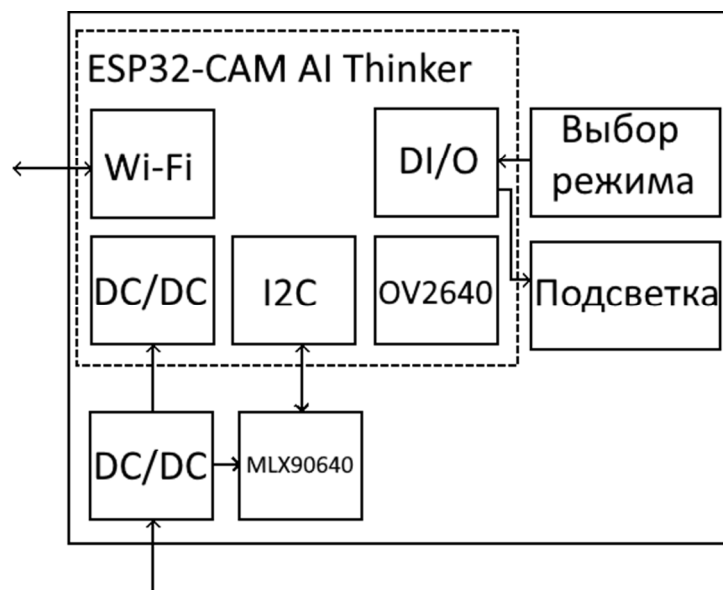


Рисунок 2.35 – Структурная схема устройства непрерывного бесконтактного измерения температуры

Основой устройства является отладочная плата ESP32-CAM AI Thinker Wi-Fi, предназначенная для проектирования высокопроизводительных и недорогих встраиваемых систем. Данная отладочная плата имеет двухъядерный

микроконтроллер под управлением операционной системы FreeRTOS, встроенный Wi-Fi модуль и видеокамеру OV2640. Для контроля и регистрации теплового излучения используется датчик типа GY-MCU90640, представляющий собой модуль ИК-камеры MLX90640 производства фирмы Melexis с микроконтроллером. Тепловизионная матрица датчика имеет размерность 32 x 24 пикселя. Невысокое разрешение выбранной матрицы не является критичным, так как с учетом интерполяции тепловизионного изображения этого достаточно, чтобы достоверно идентифицировать продукт. Наличие внешней Wi-Fi антенны и подсветки позволяет размещать устройство в закрытых секциях. Внешний вид устройства для непрерывного бесконтактного измерения температуры поверхности продукта представлено на рисунке 2.36.

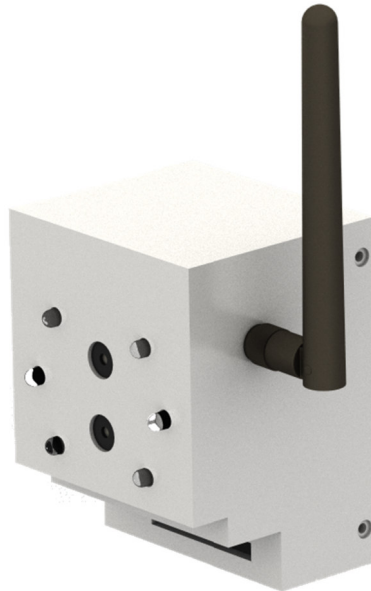


Рисунок 2.36 – Устройство для непрерывного бесконтактного измерения температуры поверхности продукта

Устройство может работать в режиме конфигурирования или мониторинга. Выбор режима осуществляется соответствующим переключателем. В режиме конфигурирования устройство создает Wi-Fi точку, при подключении к которой открывается web-интерфейс конфигурирования, представленный на рисунке 2.37. Через данный интерфейс можно настроить сетевые параметры и параметры MQTT. После конфигурирования, устройство перезагружается и переходит в

режим мониторинга. В режиме мониторинга устройство осуществляет видеосъемку и измерение теплового поля. Данные с камеры видимого спектра кодируются в формат Joint Photographic Experts Group (JPEG). Теплограмма содержит массив чисел с плавающей точкой фиксированного размера, который состоит из результатов измерений, минимальной и максимальной температуры на теплограмме, температуры датчика и коэффициента отражения при котором было произведено измерение. Теплограмму и данные с камеры видимого спектра устройство передает в систему управления с использованием протокола MQTT в формате BTF, а взаимодействие с устройством осуществляется согласно его системе команд. Структура каналов, создаваемых устройством аналогична структуре каналов, создаваемых шлюзом MQTT(BTF) и позволяет унифицировать взаимодействия с устройством в рамках единой системы. Устройство имеет тип «thermalcam» и систему команд, представленную в таблице 2.12.

The image shows a web interface for configuring a device. It is divided into two main sections: 'Сеть' (Network) and 'MQTT'. The 'Сеть' section contains 'Настройки WiFi' (WiFi Settings) with fields for 'Имя точки доступа' (Access Point Name) set to 'DEHYDRATION' and 'Пароль' (Password) masked with asterisks. The 'MQTT' section contains 'Настройки MQTT' (MQTT Settings) with fields for 'IP брокера' (Broker IP) set to '192.168.0.190', 'Порт' (Port) set to '1883', 'Пользователь' (User) and 'Пароль' (Password) fields, and 'Базовый канал для данных' (Base channel for data) set to 'dehydration/system/'. A green button at the bottom is labeled 'Применить настройки' (Apply settings).

Рисунок 2.37 – Web-интерфейс конфигурирования устройства

Таблица 2.12 – Система команд и вид данных устройства для непрерывного бесконтактного измерения температуры

Команда в виде BSON- объекта	Описание
Канал: <Базовый канал>/ thermalcam /<Идентификатор>/config/set	
<pre> {"type" : "set", "parameter" : "request",  "value" : x} </pre>	<p>Команда настраивает режим получения актуальных данных. Если параметр x равен 0, то выбирается режим по запросу. Если параметр x равен 1, то выбирается режим автоматической отправки новых данных. Ответ устройства: {"type" : "response", "parameter" : "request", "value" : x}</p>
<pre> {"type" : "set", "parameter" : "mode",  "value" : x} </pre>	<p>Команда выбора типа опроса ИК-матрицы. Если параметр x равен 0, то выбирается режим опроса чередующийся строк. Если параметр x равен 1, то выбирается режим опроса в шахматном порядке. Ответ устройства: {"type" : " response ", "parameter" : "mode", "value" : x}</p>
<pre> {"type" : "set", "parameter" : "resolution",  "value" : x} </pre>	<p>Команда выбора разрядности. Параметр x может принимать величины - 16,17,18,19. Ответ устройства: {"type" : " response ", "parameter" : "resolution", "value" : x}</p>
<pre> {"type" : "set", "parameter" : "frequency",  "value" : x} </pre>	<p>Команда выбора частоты опроса. Параметр x может принимать величины - 0.5,1,2,4,8,16. Ответ устройства: {"type" : " response ",</p>

	"parameter" : "frequency", "value" : x}
{ "type" : "set", "parameter" : "emissivity", "value" : x }	Команда настройки коэффициента излучательной способности. Параметр x может принимать в диапазоне от 0 до 1. Ответ устройства: { "type" : " response ", "parameter" : "emissivity", "value" : x }
{ "type" : "set", "parameter" : "coeff", "value" : x }	Команда настройки коэффициента фильтра. Параметр x может принимать в диапазоне от 0 до 1. Ответ устройства: { "type" : " response ", "parameter" : " coeff ", "value" : x }
{ "type" : "set", "parameter" : "flash", "value" : x }	Команда управления подсветкой. Если параметр x равен 0, то подсветка выключается. Если параметр x равен 1, то подсветка включается. Ответ устройства: { "type" : " response ", "parameter" : "flash", "value" : x }
{ "type" : "set", "parameter" : "reset", "value" : x }	Команда перезагрузки. Если параметр x равен 0, то будет произведена процедура перезагрузки камеры OV2640. Если параметр x равен 1, то будет произведена процедура перезагрузки датчика MLX90640. Если параметр x равен 2, то будет произведена процедура перезагрузки камеры и датчика. Если параметр x равен 3, то будет произведена процедура перезагрузки устройства. Ответ устройства: { "type" : " response

	", "parameter" : "reset", "value" : x}
Канал: <Базовый канал>/thermalcam/<Идентификатор>/config/get	
{"type" : "get", "parameter" : "info"}	Команда запроса состояния устройства. Ответ устройства: {"type" : " response ", "parameter" : "info", "value" : x}
{"type" : "get", "parameter" : "request"}	Команда запроса текущего режима получения актуальных данных. Ответ устройства: {"type" : "response", "parameter" : "request", "value" : x}
{"type" : "get", "parameter" : "mode"}	Команда запроса текущего режима опроса матрицы. Ответ устройства: {"type" : " response ", "parameter" : "mode", "value" : x}
{"type" : "get", "parameter" : "resolution"}	Команда запроса текущей разрядности. Ответ устройства: {"type" : " response ", "parameter" : "resolution", "value" : x}
{"type" : "get", "parameter" : "frequency"}	Команда запроса текущей частоты обновления. Ответ устройства: {"type" : " response ", "parameter" : "frequency", "value" : x}
{"type" : "get", "parameter" : "emissivity"}	Команда запроса текущего значения коэффициента излучательной способности. Ответ устройства: {"type" : " response ", "parameter" : "emissivity", "value" : x}
{"type" : "get", "parameter" : "coeff"}	Команда запроса текущего значения коэффициента фильтра. Ответ устройства: {"type" : " response ",



	"parameter" : "coeff", "value" : x}
{"type" : "get", "parameter" : "flash"}	Команда запроса текущего состояния подсветки. Ответ устройства: {"type" : "response", "parameter" : "flash", "value" : x}
Канал: <Базовый канал>/thermalcam/<Идентификатор>/stream	
{"type" : "stream", "value" : {"alive": x}}	Отправляется устройством в канал для индикации активности. Значение x принимает значение 1 и 0 поочередно.

#### 2.4.11 Выбор оборудования для управления процессом

Поскольку разрабатываемая система управления использует современный протокол MQTT и разработанный формат VTF передачи данных, а также аналитику с применением технического зрения, требуется разработать соответствующее программно-аппаратное решение для управления процессом. В рамках данной работы предлагается следующее решение, структурная схема которого представлена на рисунке 2.38.

Основой устройства является одноплатный микрокомпьютер Raspberry Pi 4 Model B, работающий под управлением операционной системы на базе Arch Linux ARM [110], являющейся простой, высокопроизводительной и функциональной для встраиваемых решений. Выбор одноплатного микрокомпьютера Raspberry Pi 4 Model B обусловлен оптимальной производительностью, достаточной для сбора и обработки информации [118]. Для локального конфигурирования, отображения текстовой и графической информации устройство имеет TFT экран с разрешением 800x600 и сенсорным вводом. Взаимодействие с устройством осуществляется по проводному интерфейсу Ethernet или беспроводному Wi-Fi.

За реализацию человека машинного интерфейса отвечает ImGui. ImGui — это библиотека графического пользовательского интерфейса, является быстрой, переносимой, независимой от средств визуализации и не требует внешних зависимостей [94]. Использует Immediate mode GUI методику программирования интерфейсов. Данная библиотека обладает большим набором графических элементов, что позволяет реализовать интерфейс любой сложности. В рамках данной работы был разработан драйвер для ImGui, который использует протокол WebSocket для отображения интерфейса в web-браузерах и взаимодействия с ним. Такое решение позволяет [19, 80, 81]. Структурная схема взаимодействия с интерфейсом через разработанный драйвер представлена на рисунке 2.39. Такое решение позволяет использовать один код интерфейса для отображения на локальном TFT экране или удаленном web-сеансе.

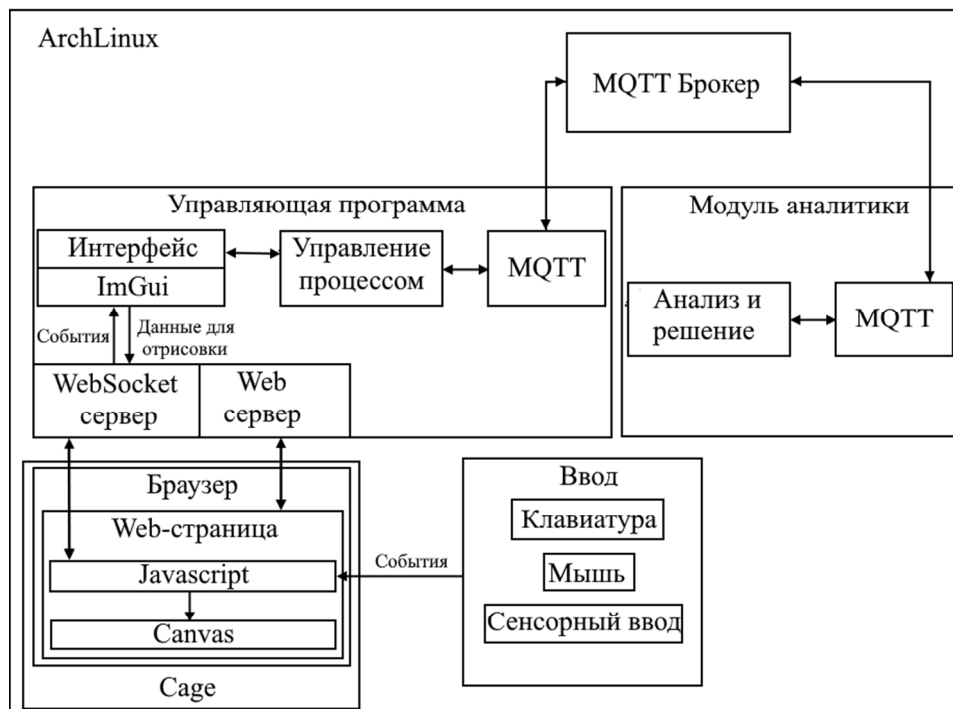


Рисунок 2.38 – Структурная схема программно-аппаратного решения для управления процессом

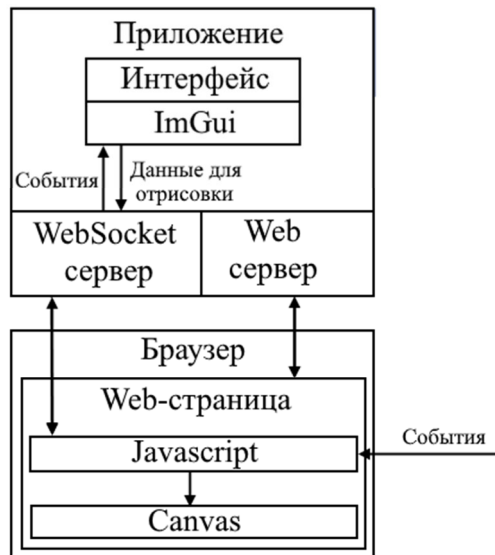


Рисунок 2.39 – Структурная схема взаимодействия с интерфейсом через драйвер

Для вывода интерфейса на TFT экран и взаимодействия с ним используется Sage с запущенным web-сеансом через Firefox браузер в киоск-режиме [92]. Sage представляет собой композитный сервер на базе Wayland ориентированный на обособленный запуск отдельных приложений в режиме киоска. При использовании Sage пользовательский интерфейс ограничен одним приложением, а действия, выходящие за рамки запущенного приложения, предотвращаются и получить доступ к операционной системе невозможно. Все вспомогательные диалоговые окна выводятся по центру экрана без возможности их изменить или переместить. Экран привязывается к одному устройству вывода. Поддерживается ввод с клавиатуры и сенсорный ввод, а также управление мышью. Sage поддерживает работу с WayVNC, представляющий собой VNC-сервер (Virtual Network Computing) для Wayland композиторов, что позволяет удалённо подключиться и взаимодействовать с графическим интерфейсом. Поскольку основной объем передаваемых по технологии VNC данных приходится на графическую информацию, выводимую на экран. Для работы требуется ширина пропускания канала до 2 Мбит/сек. В рамках данной работы для удаленного взаимодействия с интерфейсом технология VNC не используется, поскольку для этих целей используется удаленный web-сеанс для интерфейсов на базе ImGui, который менее требователен к скорости канала.

В качестве реализации брокера в данной системе используется Eclipse Mosquitto, представляющий собой сервер и клиент протокола MQTT для версий 5.0, 3.1.1 и 3.1 с открытым исходным кодом [98].

Управляющая программа и модули аналитики представляют собой микросервисы, которые взаимодействуют между собой и системой в целом по протоколу MQTT и форматом данных VTF.

Корпус для устройства был разработан в среде T-Flex и изготовлен на 3D-принтере из ABS-пластика. Внешний вид разработанного устройства представлен на рисунке 2.40.



Рисунок 2.40 – Внешний вид разработанного управляющего компьютера

#### *2.4.12 Разработка графического пользовательского интерфейса*

Для взаимодействия пользователя с программно-аппаратным комплексом был создан графический пользовательский интерфейс, основанный на представлении всех доступных пользователю системных объектов и функций в

виде графических компонентов экрана (окон, иконок, кнопок меню, списков и т.д.). Графический пользовательский интерфейс тесно связан с функционалом системы, так как через интерфейс происходит управление системой. Интерфейс обеспечивает инструменты ввода информации для работы системы и отображение результатов работы в понятном пользователю виде. На основании целей взаимодействия пользователей с системой был реализован пользовательский интерфейс состоящий из следующих окон:

- главного окна;
- меню камер;
- окна ввода и просмотра параметров процесса;
- окно просмотра графиков изменения значений параметров;
- окна настройки регуляторов температуры и влагосодержания;
- окно просмотра графика изменения значений веса;
- окно калибровки массоизмерительной системы;
- окно настройки параметров системы тепловизионного анализа;
- окно настройки положения заслонки для подачи свежего воздуха;
- окно журнала работы системы.

Разработанный программный продукт обладает следующими функциональными возможностями:

- настройка регуляторов температуры и влагосодержания;
- настройка положения заслонки для регулирования подачи свежего воздуха;
- настройка массоизмерительной системы, включающая выбор способа фильтрации сигнала, осуществление калибровки и тарирования;
- настройка параметров системы тепловизионного анализа;
- обеспечение выбора режима работы процесса;
- обеспечение ввода и редактирования параметров процесса;
- импорт параметров процесса из файла;
- экспорт параметров процесса в файл;

- управление запуском, приостановкой, продолжением и остановкой процесса;
- отображение изменений параметров технологического процесса в графическом и текстовом видах.
- журналирование событий.

Вид главного окна (рисунок 2.41) может изменяться в зависимости от состояния процесса в каждой секции сушки. Возможные состояния процесса отображаются цветом: работает – зеленый, на паузе – желтый, не работает – серый, авария – красный.

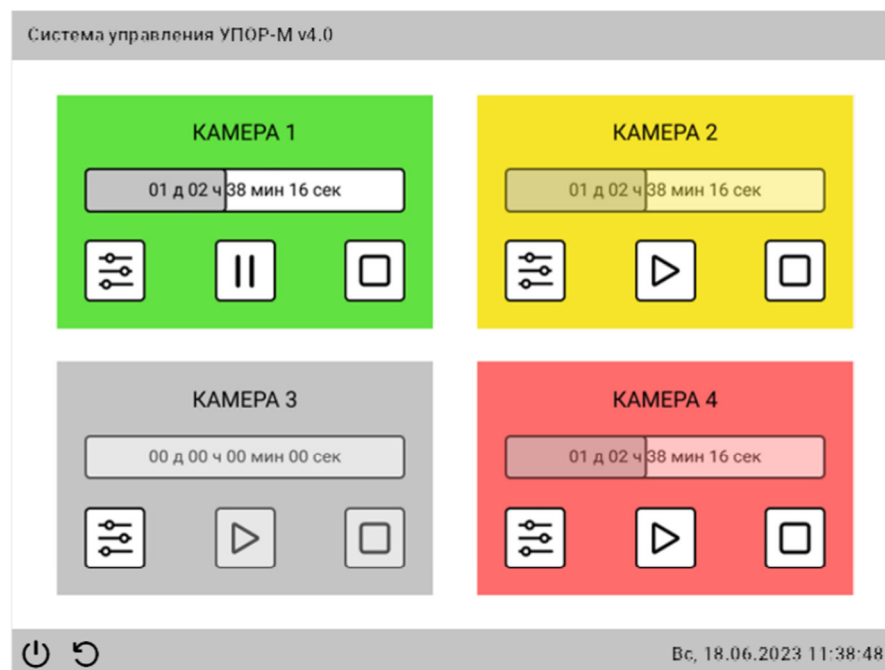


Рисунок 2.41 – Главное окно программы во время работы процесса

Вид окна отображения состояния процесса в камере (рисунок 2.42), позволяет управлять состоянием процесса в секции, переходить к введенным параметрам, просмотру параметров, графиков и настройкам. Запуск процесса возможен после ввода параметров или паузы. На прогресс баре отображается время до завершения процесса.

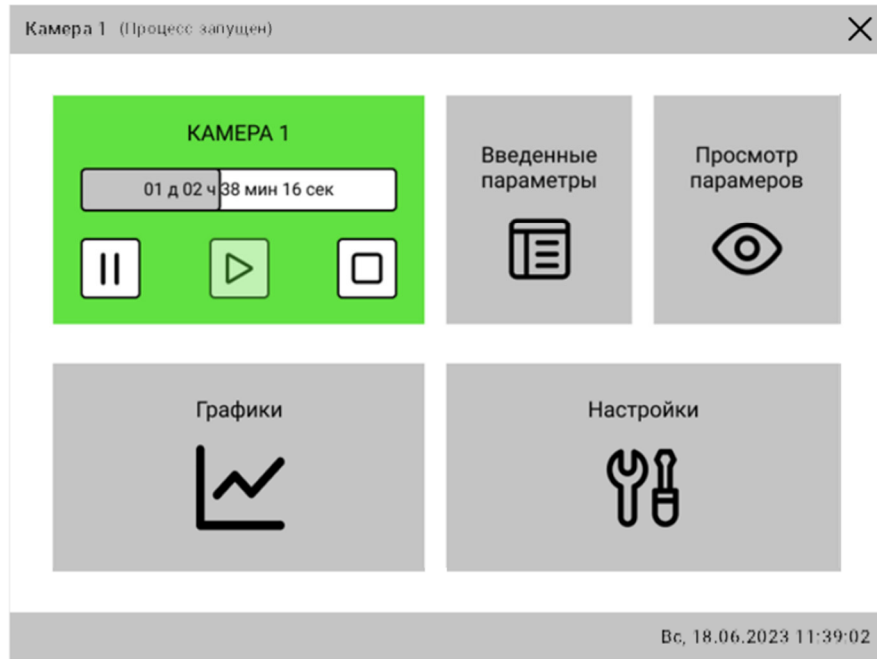


Рисунок 2.42 – Меню секции во время работы процесса

Окно выбора метода процесса обезвоживания (рисунок 2.43) позволяет выбрать один из предлагаемых методов обезвоживания.

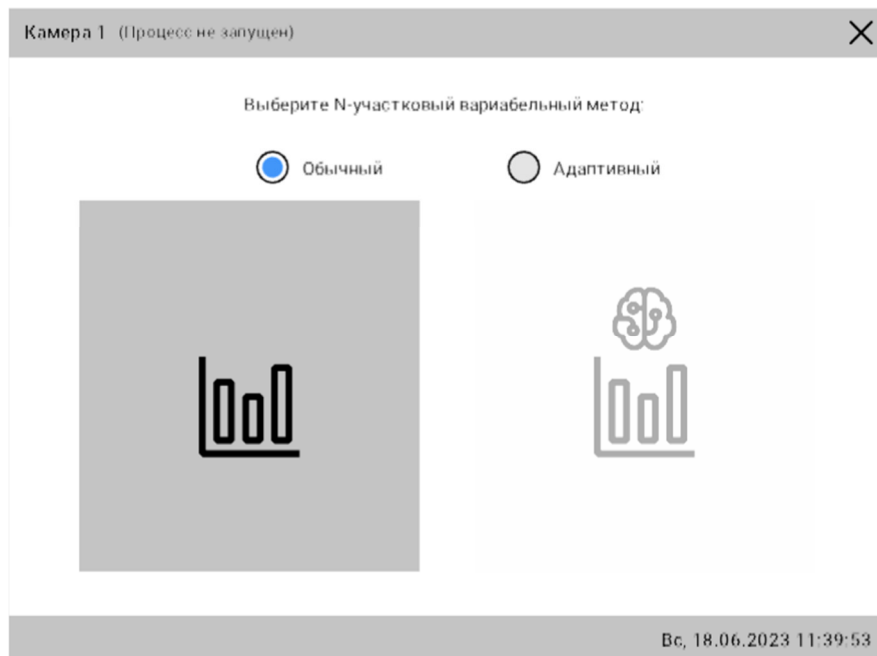


Рисунок 2.43 – Окно ввода параметров процесса

Окно ввода параметров обычного N-вариабельного метода (рисунок 2.44) позволяет конфигурировать 10 параметров процесса сушки. Кнопки «-» и «+» отвечают за удаление и добавление участка. Кнопки «влево», «вправо» – за переключение между участками. Кнопка «очистить» обнуляет значения параметров, кнопка «сохранить» инициирует диалоговое окно сохранения текущих параметров в файл, кнопка «загрузить» инициирует диалоговое окно выбора файла для загрузки параметров в таблицу, кнопка «применить» сохраняет текущие значения параметров.

	Участок 1 из 1	
Период участка, ч	16.00	
Температура сушки, °C	25.0	
Влажность сушки, %	20.0	
Скорость потока при сушке, м/с	80.0	
Температура релаксации, °C	20.0	
Влажность релаксации, %	40.0	
Скорость потока при релакс., м/с	40.0	
Нач. коэф. релаксации, %	90.0	
Конеч. коэф. релаксации, %	60.0	
Количество интервалов	4	

Рисунок 2.44 – Окно ввода параметров процесса

Типовое окно настройки регулятора технологического параметра представлено на рисунке 2.45. Блок «Регулирование», содержит значения уставки, параметра, рассогласования и выхода ПИД-регулятора. Блок «Диаграмма ПИД-регулятора», отражает изменение параметров регулирования на графике. Блок «Режим работы ПИД/Ручной», позволяет выбрать автоматический или ручной режим, указать величину управляющего сигнала и вид выходного сигнала. Блок «Настройка ПИД-регулятора», включает поля ввода, П-, И- и Д-составляющие, зону нечувствительности, и шаг. По нажатию



на кнопку «Автонастройка» блоки «Режим работы ПИД» и «Настройка ПИД-регулятора» заменяются блоком для ввода параметров автонастройки.

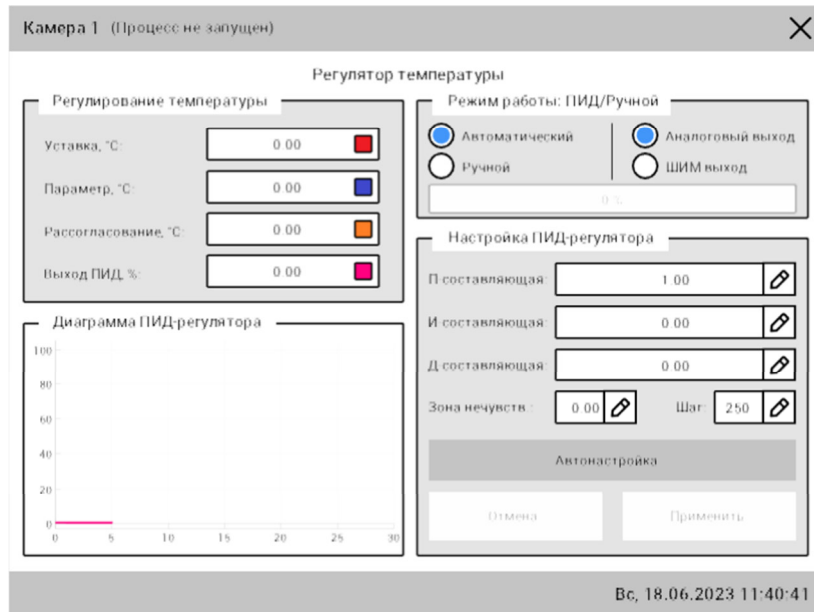


Рисунок 2.45– Окно настройки регулятора температуры в секции

Типовое окно просмотра технологических параметров процесса на рисунке 2.46. Окно содержит информацию о текущем и заданном значении технологических параметров, время начала и конца процесса, текущий этап процесса и тепловое состояние продукта.

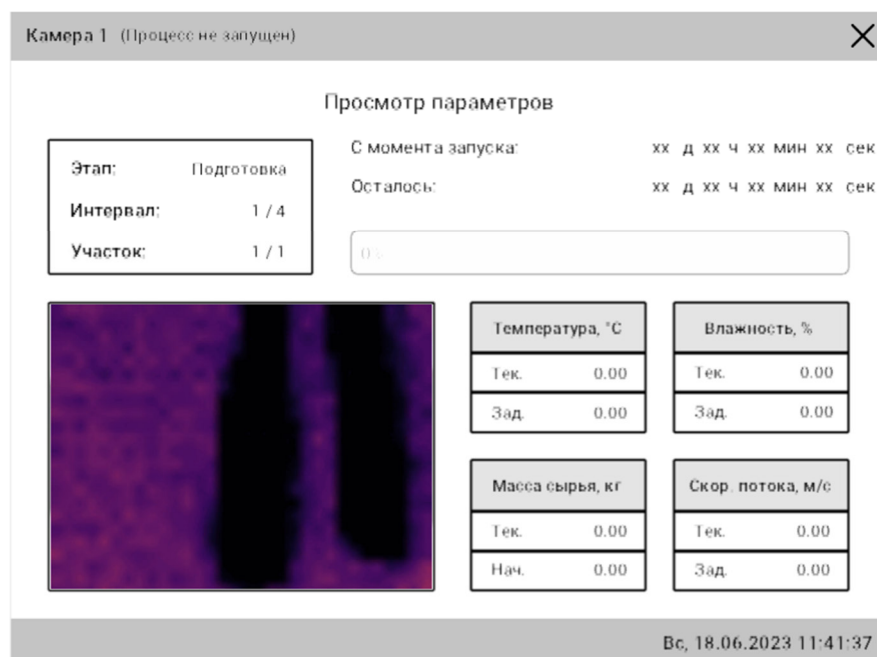


Рисунок 2.46 – Окно просмотра технологических параметров

Калибровка массоизмерительной системы осуществляется через соответствующее окно, представленное на рисунке 2.47. Данное окно содержит формулу текущего полинома, выпадающий список с выбором степени полинома, кнопки выбора ручного или автоматического задания коэффициентов, содержимое ручного и автоматического режимов задания, кнопки «Отмена» и «Применить». При выборе ввода коэффициентов вручную открывается отдельное окно для ввода коэффициентов.

При автоматической калибровке пользователь выполняет инструкцию, затем появляется сообщение с таймером обратного отсчета. По выполнении всех инструкций в окне автоматической калибровки появляются подобранные коэффициенты.

При нажатии на кнопку «Применить» вид текущего полинома изменяется в соответствии с заданными коэффициентами ручного или автоматического режимов.

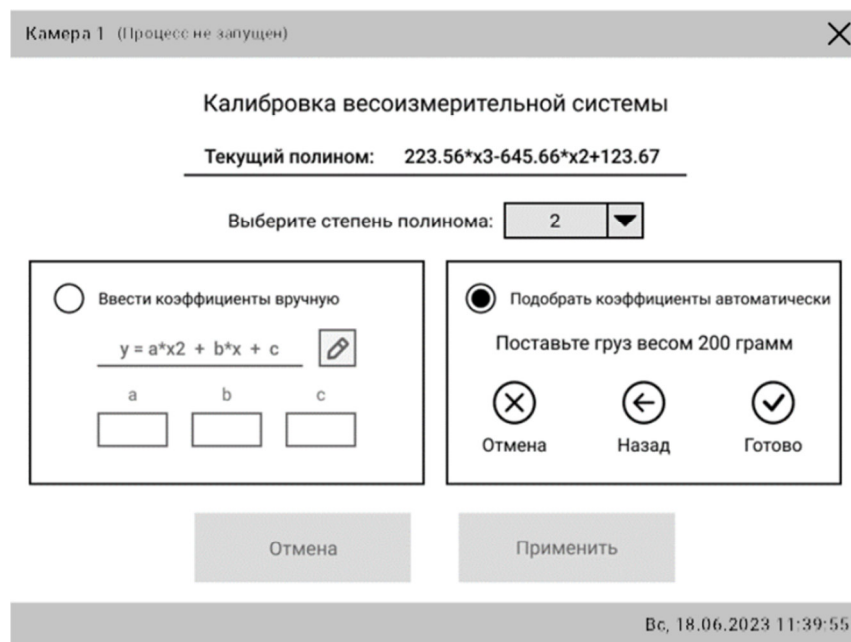


Рисунок 2.47 – Окно калибровки массоизмерительной системы

Окно конфигурирования системы тепловизионного анализа (рисунок 2.48) позволяет выбрать цветовую шкалу для визуализации тепловизионных данных.

При выборе обычного N-вариабельного метода доступно создание зон контроля температуры.

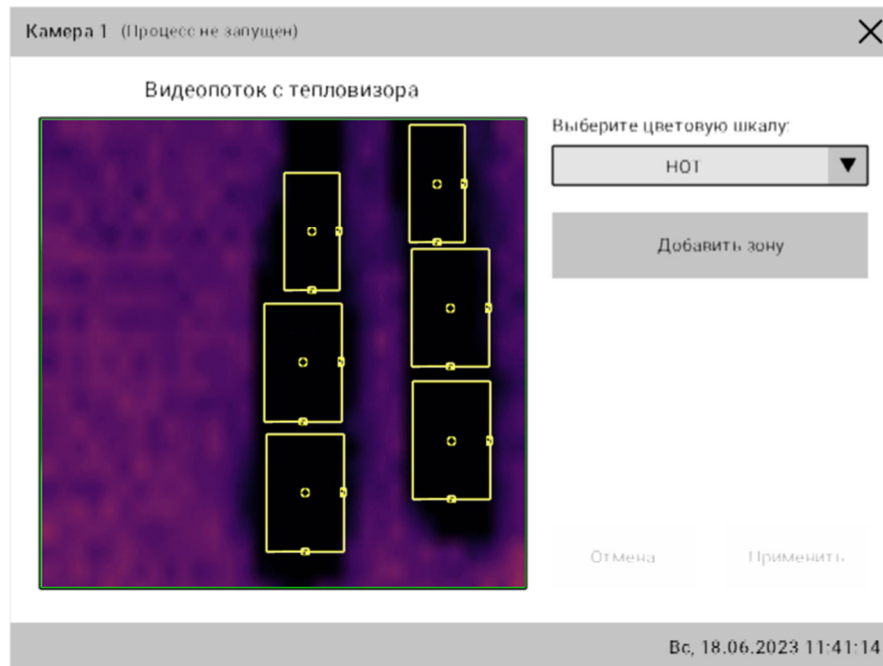


Рисунок 2.48 – Окно конфигурирования системы тепловизионного анализа

#### 2.4.13 Система управления малогабаритной сушильной установкой

Существующие многоконтурные системы автоматического регулирования проектируются либо без учета взаимных связей в случае, если к качеству управления не предъявляются жесткие требования, либо используется развязка каналов для обеспечения функциональной независимости контуров [2, 9]. Однако, для ряда технологических процессов подходы, связанные с обеспечением условия автономности контуров, не гарантируют их выполнение для всех возможных режимов работы. В таких случаях необходимо введение специальных вычислительных устройств, определяющих параметры объекта в процессе работы системы и производящих перенастройку перекрестных связей многоконтурной системы.

Поскольку секция сушки с точки зрения управления представляет собой многосвязный объект. Для упрощения системы управления и развязывания контуров в данной работе предлагается перейти от управления по температуре и

относительной влажности к управлению по температуре и влагосодержанию. Поскольку из теории тепловлажностной обработки воздуха известно, что на всем диапазоне возможных параметров режима на процесс холодной сушки температура не оказывает влияние на влагосодержание. Прирост влаги осуществляется только за счет удаляемой влаги из продукта и из внешних источников в роли которых выступает генератор туман. В свою очередь прирост влаги адиабатическим способом влияет на температуру в сторону уменьшения, тем самым являясь для контура температуры возмущением.

Структурная схема предлагаемой системы автоматического управления конвективным обезвоживанием представлена на рисунке 2.49 [40]. Данная система реализована в установке поиска оптимальных технологических режимов обезвоживания УПОР-М. В схеме имеется два контура управления: по влагосодержанию и температуре сушильного агента, на которые может оказываться возмущающее воздействие внешних факторов ( $F$ ).

Входными параметрами системы являются заданные в режиме обезвоживания температура и относительная влажность ( $T_{зад}$ ,  $\varphi_{зад}$ ). Эти параметры позволяют вычислить по методике расчета  $i$ -диаграмм заданное влагосодержание сушильного агента при обезвоживании ( $d_{зад}$ ).

В сушильной камере по данным с модуля сбора донных и поверочного датчик температуры и относительной влажности ОВЕН ПВТ100 высчитывается среднее значение технологических параметров. На основании полученных значений параметров сушильного агента в управляющем контроллере осуществляется расчет текущего значения влагосодержания среды ( $d_{тек}$ ) и рассогласования влагосодержания ( $\Delta d$ ). При  $\Delta d > 0$  (недостаточное влагосодержание) регулятором осуществляется воздействие на генераторы тумана, что приводит к увеличению влагосодержания и уменьшению  $\Delta d$ . Избыточное влагосодержание сушильного агента приводит к отрицательному управлению на выходе регулятора ( $U < 0$ ). Управляющее воздействие подается на вентилятор, находящийся в воздуховоде, соединяющем камеру подготовки сушильного агента ( $T_{под}$ ,  $d_{под}$ ) с секцией обезвоживания. Большее воздействие

приводит к увеличению частоты вращения вентилятора, что существенно повышает динамику воздухообмена между секциями подготовки и обезвоживания и приводит к снижению текущего значения влагосодержания среды ( $d_{тек}$ ).

В контуре регулирования температуры при положительном рассогласовании ( $\Delta T > 0$ ) на выходе ПИД-регулятора формируется управляющее воздействие на нагреватель, что приводит к увеличению значения температуры и уменьшению рассогласования. При превышении заданного значения температуры в камере осуществляется управляющее воздействие на вентилятор аналогично контуру управления влагосодержанием сушильного агента.

На протяжении всего процесса обезвоживания осуществлялся тепловизионный контроль температуры поверхности рыбного сырья в совокупности с видео-мониторингом состояния сырья с применением метода количественной термографии. Для контроля эффективности обезвоживания в камере сушки применяется массоизмерительная система для передачи данных о потере массы сырья в управляющий контроллер.

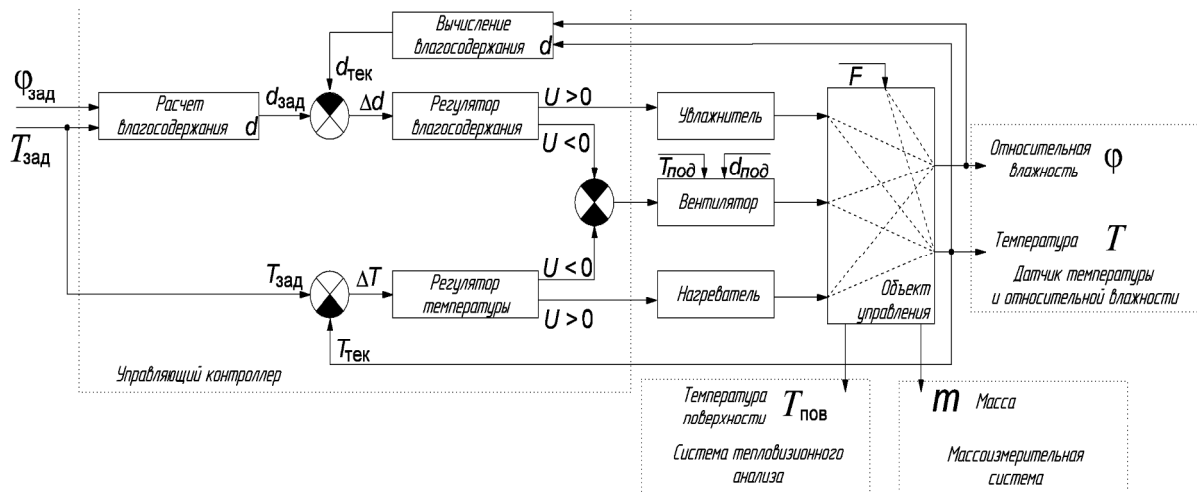


Рисунок 2.49 – Структурная схема системы автоматического управления процессом обезвоживания рыбного сырья

## Выводы по 2 главе

В данной главе представлена программно-целевая модель исследований. Рассмотрена существующая система управления сушильной установкой. Рассмотрены недостатки существующей системы.

Разработаны элементы необходимые для модернизации малогабаритной сушильной установки исследования процессов обезвоживания.

Предложена реализация массоизмерительной системы, которая позволяет фиксировать начальную массу продукта и отслеживать динамику изменения массы в течение технологического процесса.

Предложена реализация устройства непрерывного контроля температуры поверхности сырья с использованием тепловизионного анализа и компьютерного зрения.

Предложен формат передачи динамических структур данных, обеспечивающий сжатие больших объёмов данных и минимизирующий время на интерпретацию данных в процессе десериализации и являющийся легко интегрируемым во встраиваемые системы.

Предложена реализация устройства шлюза позволяющего создать систему управления на базе предлагаемой структуры каналов и формата VTF.

Предложена реализация человеко-машинного интерфейса на базе графической библиотеки ImGui и web-технологий.

Предложено программно-аппаратное решения для реализации подсистемы управления процессом.

Предложена система автоматического управления процессом обезвоживания по температуре и влагосодержанию.

## ГЛАВА 3. Результаты разработки программно-аппаратного комплекса и исследования

### 3.1 Исследование теоретической модели тепловлажностной обработки сушильного агента

Поскольку получение сушильного агента с заданными параметрами представляет собой тепловлажностную обработку воздуха, было составлено математическое описание основных операций обработки: нагрев, охлаждение, осушение, увлажнение и смешивание двух потоков [54].

Для определения параметров воздуха в результате тепловлажностной обработки воздуха, используют I-d диаграмму [1, 99], разработанную российским ученым Леонидом Константиновичем Рамзиным и ее аналоги - диаграмму Молье, разработанную немецким теплотехником Рихардом Молье или диаграмму Кэрриера (также называемую психрометрической диаграммой или диаграммой Гросвенора).

I-d диаграмма – диаграмма в косоугольной системе координат, на которую нанесены линии температуры по сухому  $t$  и влажному  $t_m$  термометру, энтальпии  $i$ , влагосодержания  $d$  и дуги относительной влажности воздуха  $\varphi, \%$ . Горизонтальной осью на I-d диаграмме является влагосодержание  $d$ , вертикальной – температура по сухому  $t$  термометру, а под наклоном к горизонтальной оси – энтальпия  $i$ . Осью переходящей от вертикального направления к горизонтальному является относительная влажность воздуха  $\varphi, \%$ . I-d диаграмма построена для стандартного барометрического давления 101325 Па (1013 мбар, 760 мм рт. ст.).

I-d диаграмма является номограммой, связывающей все основные показатели, и позволяет определить состояние влажного воздуха по любым известным двум показателям [45]. По I-d диаграмме можно определить такие параметры влажного воздуха, как температура по сухому и влажному термометру, влагосодержание, относительная влажность, энтальпия, точка росы [79].

Температура по сухому термометру, обычно называемая «температурой воздуха», является показателем теплосодержания и определяется с помощью термометра, свободно контактирующего с воздухом, но защищенного от излучения и влаги.

Температура мокрого термометра — это адиабатическая температура насыщения, которую воздух имеет в состоянии насыщения в результате адиабатического охлаждения.

Точка росы — это температура воздуха, до которой влажный воздух должен быть охлажден, чтобы стать насыщенным водяным паром и начать конденсироваться.

Влажность представляет собой количество водяного пара, присутствующего в воздухе, и может быть выражена абсолютной или относительной величиной.

Абсолютная влажность, представляет собой общую массу водяного пара, присутствующего в некотором объеме воздуха и определяется по формуле:

$$f = m_{\text{вод. пара}} / V_{\text{воздуха}} \quad (3.1)$$

где  $m_{\text{вод. пара}}$  — масса водяного пара, г;

$V_{\text{воздуха}}$  - объем воздуха, м<sup>3</sup>.

Относительную влажность можно определить, как отношение парциального давления водяного пара в воздухе к парциальному давлению насыщенного пара, при температуре воздуха по сухому термометру. Определяется по формуле:

$$\varphi = (p_w / p_{ws}) \cdot 100\% \quad (3.2)$$

где  $p_w$  — парциальное давление водяного пара во влажном воздухе, г;

$p_{ws}$  - давление насыщения водяного пара, м<sup>3</sup>.

Давление воздуха показывает барометрическое давление влажного воздуха и определяется высотой над уровнем моря. Величина барометрического давления равна сумме парциального давления сухого воздуха и парциального давления водяного пара.



Парциальное давление водяного пара показывает, какое давление имел бы водяной пар, находящийся во влажном воздухе, если бы он один занимал объем, равный объему этого влажного воздуха, при той же температуре. Парциальное давление водяного пара может быть определено по формуле:

$$\begin{aligned} p_w &= 611.21 \cdot e^{\left(18.678 - \frac{t}{234.5}\right) \cdot \frac{t}{257.14+t}} \text{ при } t \geq 0 \\ p_w &= 611.15 \cdot e^{\left(23.036 - \frac{t}{333.7}\right) \cdot \frac{t}{279.82+t}} \text{ при } t < 0 \end{aligned} \quad (3.3)$$

где  $t$  – температура по сухому термометру, °С;

$p_n$  – максимальное значение абсолютной влажности, г/м<sup>3</sup>.

Парциальное давление сухого воздуха зависит от температуры воздуха, а парциальное давление водяного пара от температуры воздуха и содержания влаги в нем.

Влагосодержание влажного воздуха представляет собой отношение массы водяного пара к массе сухого воздуха, определяется по формуле:

$$d = m_w / m_a \quad (3.4)$$

где  $m_w$  – масса водяного пара, кг;

$m_a$  – масса сухого воздуха, кг.

Основываясь на Законе идеального газа, влагосодержание может быть выражено следующим образом:

$$d = 621.98 p_w / (p_a - p_w) \quad (3.5)$$

где  $p_w$  – парциальное давление водяного пара во влажном воздухе, Па;

$p_a$  – атмосферное давление влажного воздуха, Па.

Энтальпия влажного воздуха включает энтальпию сухого воздуха (ощутимое тепло) и энтальпию водяного пара (скрытое тепло). Общая энтальпия представляет собой ощутимое и скрытое тепло. Удельная энтальпия влажного воздуха, показывает какое количество теплоты (общая энтальпия) содержится во влажном воздухе при заданной температуре и давлении, отнесенное к 1 кг сухого воздуха и определяется следующим образом:

$$i = 1.006 \cdot t + d \cdot (1.89 \cdot t + 2501) \quad (3.6)$$

где  $t$  – температура по сухому термометру, °С;

$d$  – влагосодержание, кг/кг<sub>с.в.</sub>

На основании уравнений 3.2-3.6 разработаны структурные схемы расчета относительной влажности, влагосодержания и удельной энтальпии представленные на рисунках 3.1-3.3. Данные модели позволяют описать I-d диаграмму и процессы на ней.

Входными параметрами структурной схемы расчета относительной влажности ( $\phi$ ) являются температура по сухому термометру ( $t$ ) в градусах Цельсия, влагосодержание ( $d$ ) в г/кг<sub>с.в.</sub> и атмосферное давление влажного воздуха ( $p_{atm}$ ) в Паскалях. Рассчитанное значение относительной влажности представлено в процентах от 0 до 100.

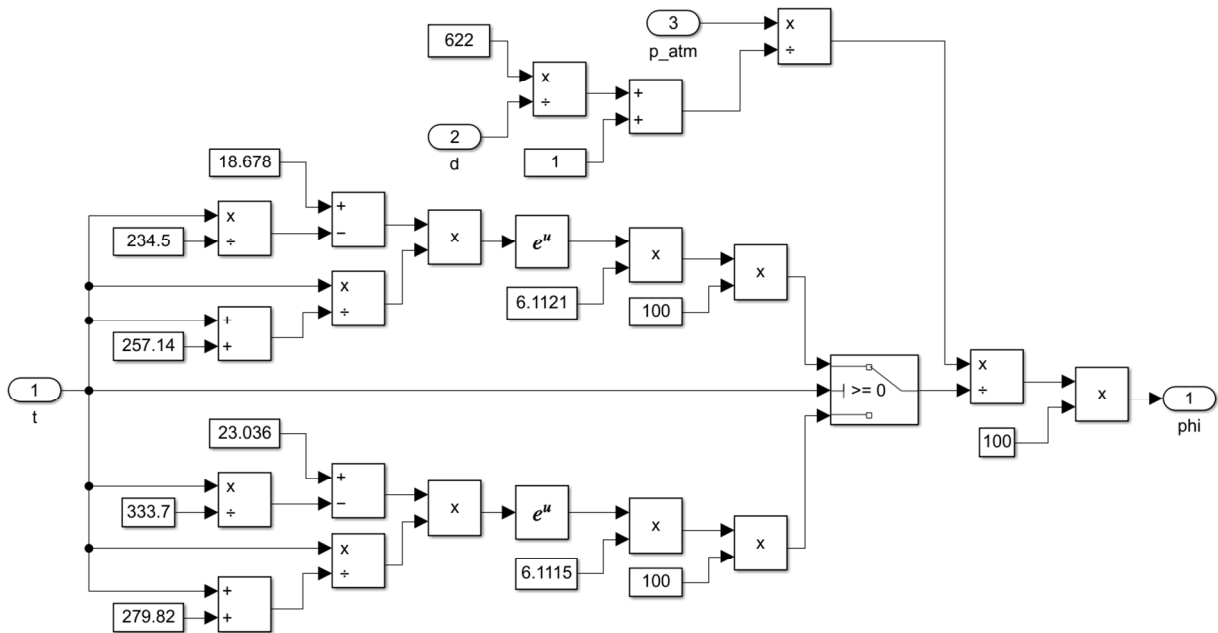


Рисунок 3.1 – Структурная схема расчета относительной влажности

Входными параметрами структурной схемы расчета влагосодержания ( $d$ ) являются температура по сухому термометру ( $t$ ) в градусах Цельсия, относительная влажность ( $\phi$ ) в процентах от 0 до 100 и атмосферное давление влажного воздуха ( $p_{atm}$ ) в Паскалях. Рассчитанное значение влагосодержания представлено в г/кг<sub>с.в.</sub>

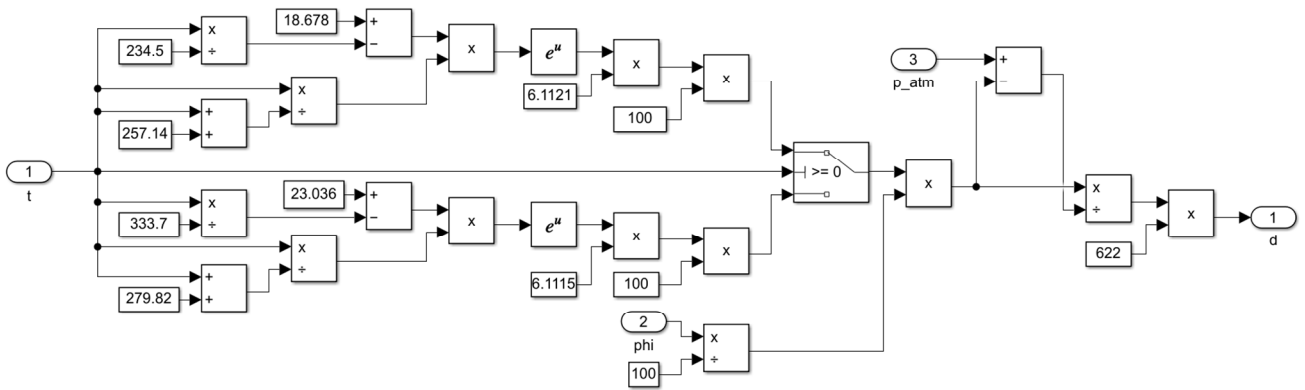


Рисунок 3.2 – Структурная схема расчета влагосодержания

Входными параметрами структурной схемы расчета удельной энтальпии ( $i$ ) являются температура по сухому термометру ( $t$ ) в градусах Цельсия и влагосодержание ( $d$ ) в г/кг<sub>с.в.</sub>. Рассчитанное значение удельной энтальпии представлено в кДж/кг.

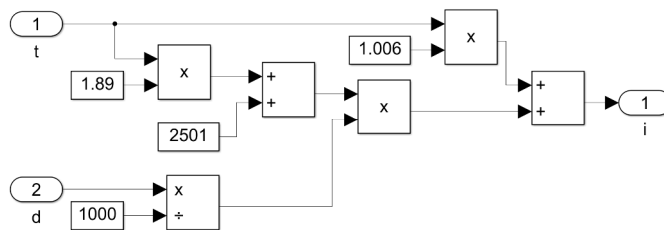


Рисунок 3.3 – Структурная схема расчета удельной энтальпии влажного воздуха

Процесс нагрева воздуха при прохождении его через различные нагревательные устройства из состояния с параметрами ( $t_A$  и  $d_A$ ) до состояния с параметрами ( $t_B$  и  $d_B$ ) происходит без изменения его влагосодержания (рисунок 3.4),  $d_A = d_B = const$ , и уменьшении относительной влажности  $\varphi$ .

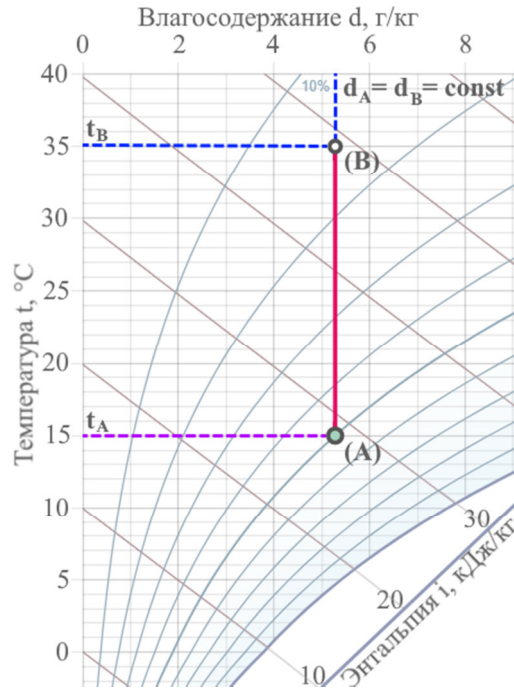


Рисунок 3.4 – Процесс нагрева на I-d диаграмме влажного воздуха

Для описания данного процесса составлена структурная схема, представленная на рисунке 3.5. Входными параметрами модели являются начальная температура ( $t$ ) в градусах Цельсия и влагосодержание ( $d$ ) в г/кг<sub>с.в.</sub> и конечная температура ( $t_{increase}$ ) в градусах Цельсия. Выходными параметрами температура ( $t_{out}$ ) в градусах Цельсия и влагосодержание ( $d_{out}$ ) в г/кг<sub>с.в.</sub>.

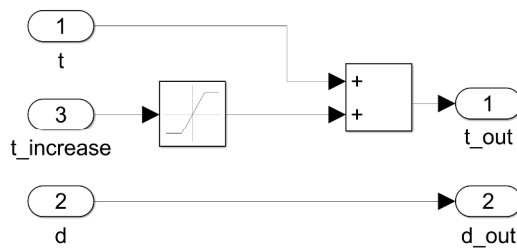


Рисунок 3.5 – Структурная схема модели процесса нагрева на I-d диаграмме влажного воздуха

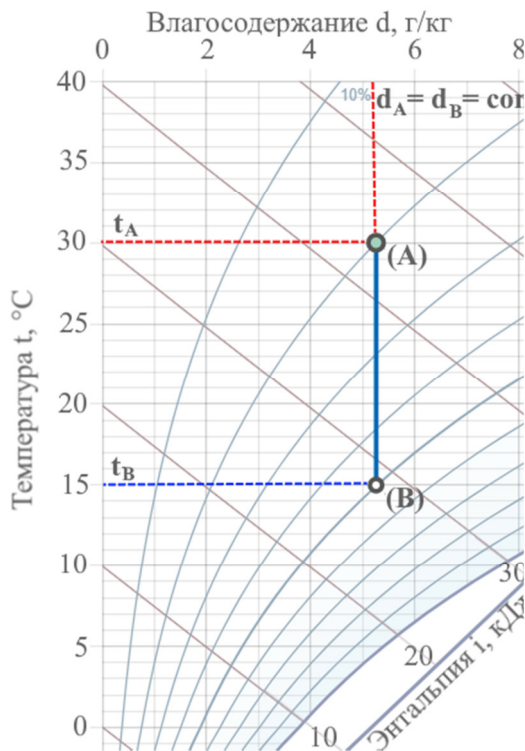
Процесс идеального охлаждения воздуха при прохождении его через различные охладительные устройства из состояния с параметрами ( $t_A$  и  $d_A$ ) до состояния с параметрами ( $t_B$  и  $d_B$ ) происходит также без изменения его

влажностердания (рисунок 3.6, а),  $d_A = d_B = const$ , и увеличением относительной влажности  $\varphi$ .

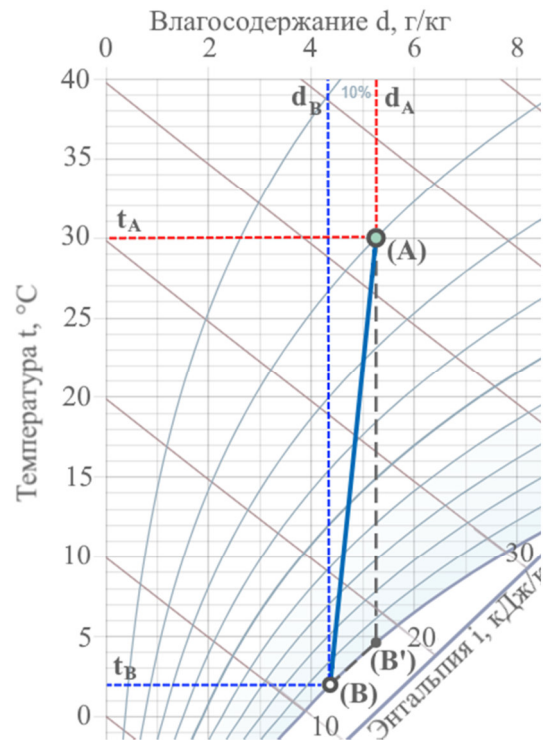
Однако после того, как воздух оказывается насыщенным, точка  $B'$  ( $\varphi=100\%$ ), дальнейшее охлаждение сопровождается конденсацией пара и уменьшением влагосодержания (рисунок 3.6, б) на величину:

$$\Delta d = d_A - d_{B'}, \text{ г/кг.} \quad (3.7)$$

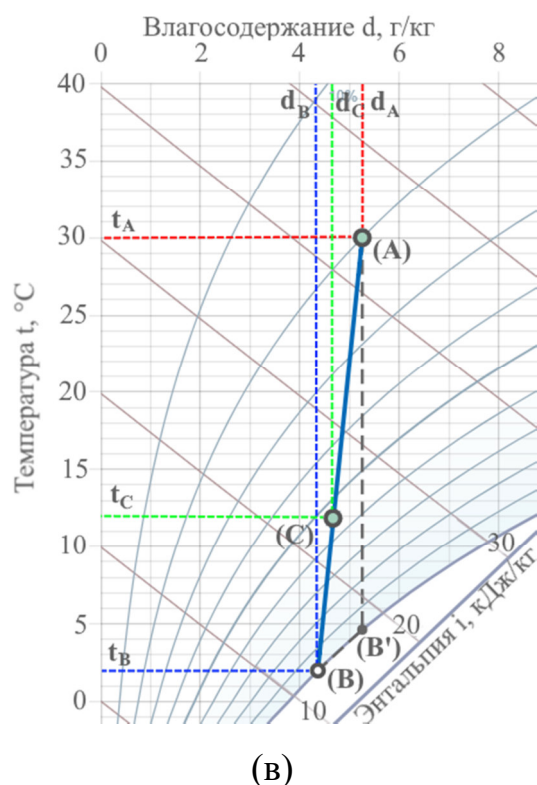
Процесс реального охлаждения воздуха сложный и состоит из двух процессов (рисунок 3.6, в). Первый, охлаждение части воздуха, соприкасающегося с охлаждающей поверхностью до температуры этой поверхности. Второй, смешивание потоков воздуха, который соприкоснулся с охлаждающей поверхностью, точка  $B$ , и который избежал контакта с охлаждающей поверхностью, точка  $A$ . Результат смешивания, точка  $C$  зависит конструктивных особенностей охладителя.



(а)



(б)



(в)

Рисунок 3.6 – Процесс охлаждения на I-d диаграмме влажного воздуха: процесс идеального охлаждения без изменения влагосодержания (а); процесс идеального охлаждения с изменением влагосодержания (б); процесс реального охлаждения (в)

Для описания процесса идеального охлаждения составлена структурная схема, представленная на рисунке 3.7. Входными параметрами модели являются начальные температура ( $t$ ) в градусах Цельсия и влагосодержание ( $d$ ) в г/кг<sub>с.в.</sub> и конечная температура ( $t_{decrease}$ ) в градусах Цельсия. Выходными параметрами температура ( $t_{out}$ ) в градусах Цельсия и влагосодержание ( $d_{out}$ ) в г/кг<sub>с.в.</sub>. Учет изменения влагосодержания в данном процессе осуществляется модулем (*constrain\_humidity\_ratio\_1*) структурная схема которого представлена на рисунке 3.8.

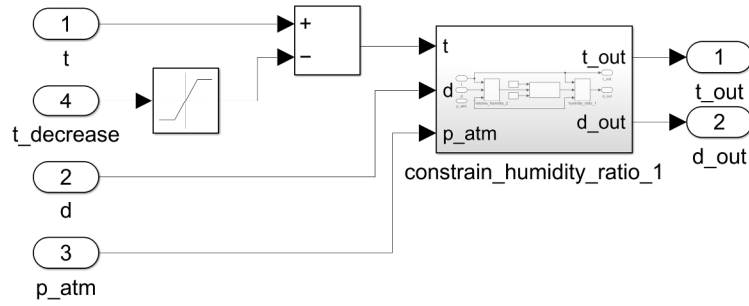


Рисунок 3.7 – Структурная схема модели процесса идеального охлаждения на I-d диаграмме влажного воздуха

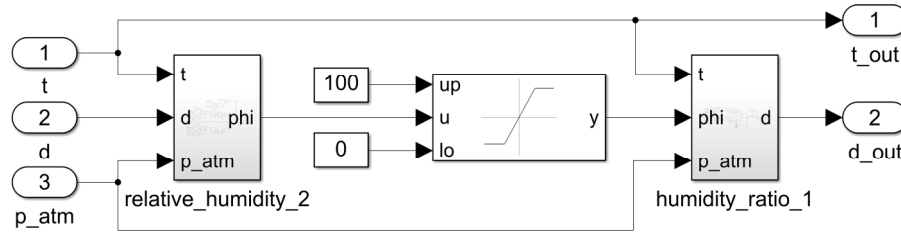


Рисунок 3.8 – Структурная схема изменения влагосодержания

Процесс смешивания воздуха с двумя разными параметрами представляет собой прямую линию, соединяющую точки с этими параметрами. Точка смеси находится на расстоянии обратно пропорциональном массам смешиваемых частей воздуха.

При смешении воздуха в количестве  $G_A$  с параметрами  $(i_A, t_A$  и  $d_A)$  смешивается с воздухом, количество которого  $G_B$ ,  $(i_B, t_B$  и  $d_B)$  (рисунок 3.9), количество смеси  $G_C$  определяют из уравнения материального баланса:

$$G_C = G_A + G_B \tag{3.8}$$

Параметры смеси определяются из уравнений теплового и влажностного балансов:

$$G_A \cdot i_A + G_B \cdot i_B = G_C \cdot i_C, \tag{3.9}$$

$$G_A \cdot d_A + G_B \cdot d_B = G_C \cdot d_C, \tag{3.10}$$

$$i_C = \frac{G_A \cdot i_A + G_B \cdot i_B}{G_A + G_B}, \tag{3.11}$$

$$d_C = \frac{d_A \cdot G_A + d_B \cdot G_B}{G_A + G_B}. \tag{3.12}$$

где  $i_A, i_B$  – удельная энтальпии смешиваемых потоков воздуха, кДж/кг;

$G_A, G_B$  – массы смешиваемых потоков воздуха, кг;

$d_A, d_B$  – влагосодержания смешиваемых потоков, г/кг.

Поскольку направление линии процесса смешения известно, то достаточно выполнить расчет одного из параметров точки смеси ( $i_C$  или  $d_C$ ). Точка смеси С делит отрезок А-В в отношении, обратном пропорциональном смешиваемым количествам. Положение точки С можно определить также из отношения отрезков линии смеси:

$$\frac{AC}{CB} = \frac{G_B}{G_A} \quad (3.13)$$

В случае, когда линия смеси пересекает область тумана (линия А<sub>1</sub>-В<sub>1</sub> на рисунке 3.10), то смешение потоков воздуха происходит с выпадением конденсата. Принимают, что действительное положение точки смеси находится на линии насыщения  $\varphi = 100\%$  при той же энтальпии (точка С<sub>1</sub>).

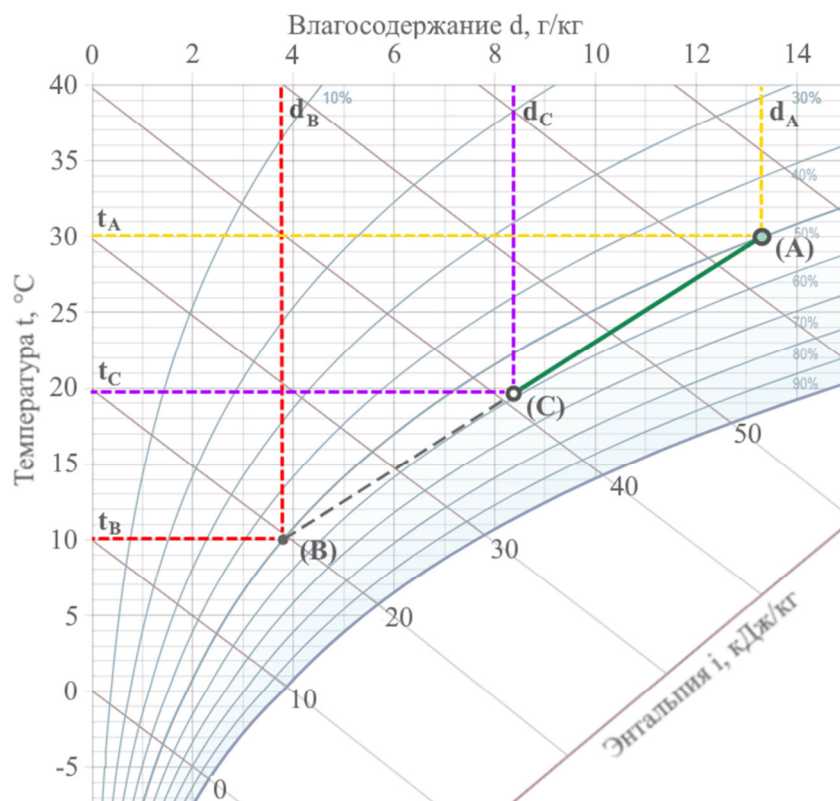


Рисунок 3.9 – Процесс смешения на I-d диаграмме влажного воздуха без выпадения конденсата



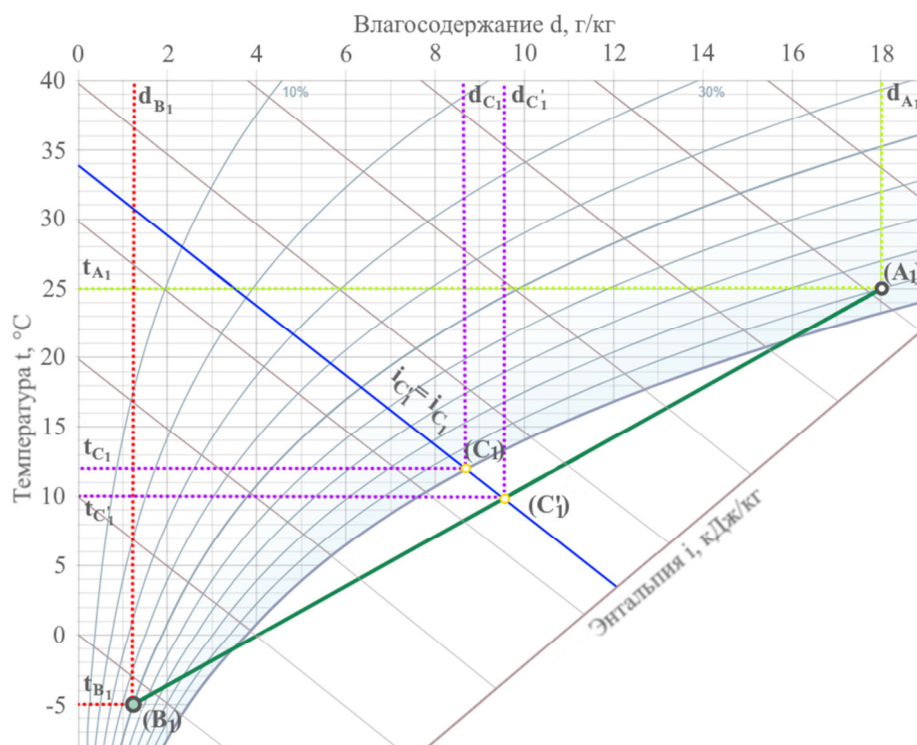


Рисунок 3.10 – Процесс смешения на I-d диаграмме влажного воздуха с выпадением конденсата

Для описания процесса смешения двух потоков составлена структурная схема, представленная на рисунке 3.11. Входными параметрами модели являются температура ( $t_1$ ) в градусах Цельсия и влагосодержание ( $d_1$ ) в г/кг<sub>с.в.</sub> первого потока, температура ( $t_2$ ) в градусах Цельсия и влагосодержание ( $d_2$ ) в г/кг<sub>с.в.</sub> второго потока и коэффициент смешения в диапазоне от 0 до 1. Выходными параметрами температура ( $t_{out}$ ) в градусах Цельсия и влагосодержание ( $d_{out}$ ) в г/кг<sub>с.в.</sub>

Поскольку случай смешения с выпадением конденсата требует определения параметров влажного воздуха на линии насыщения  $\varphi = 100\%$  с заданной удельной энтальпией, а аналитическое решение довольно сложное, в данной модели применяется итерационный метод поиска с заданной точностью. Структурная схема поиска параметров влажного воздуха на линии насыщения  $\varphi = 100\%$  с заданной удельной энтальпией представлена на рисунке 3.12.

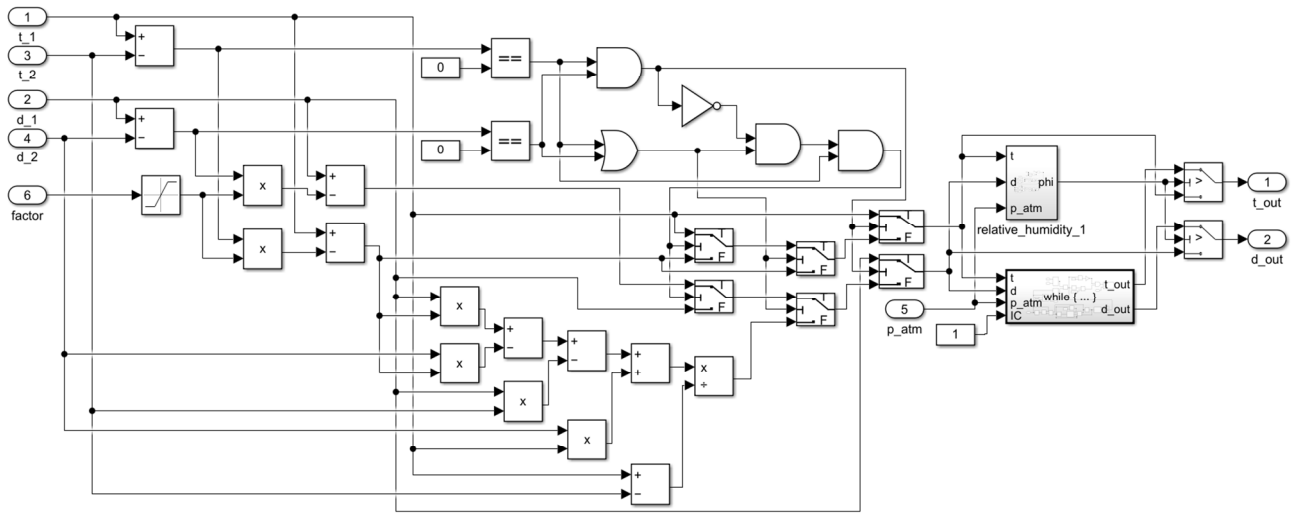


Рисунок 3.11 – Структурная схема процесса смешения на I-d диаграмме влажного воздуха с выпадением конденсата

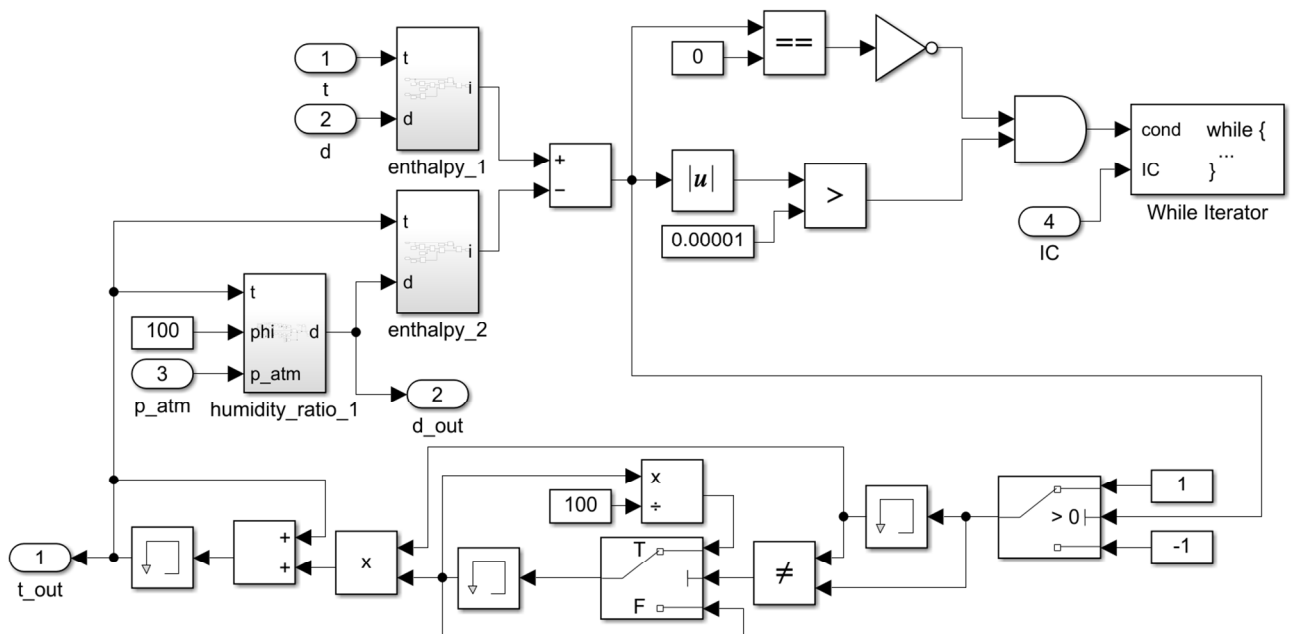


Рисунок 3.12 – Структурная схема поиска параметров влажного воздуха на линии насыщения  $\phi = 100\%$  с заданной удельной энтальпией

Процесс увлажнения воздуха подразделяется на два вида:

- адиабатическое увлажнение;
- изотермическое увлажнение.

Процесс адиабатического увлажнения (отрезок *A-B* на рисунке 3.13) идет по линии постоянной энтальпии и заканчивается в точке, соответствующей температуре мокрого термометра.

Процесс изотермического увлажнения (отрезок  $A-C$  на рисунке 3.13) идет по линии постоянной температуры по сухому термометру и заканчивается в точке  $\varphi = 100\%$ .

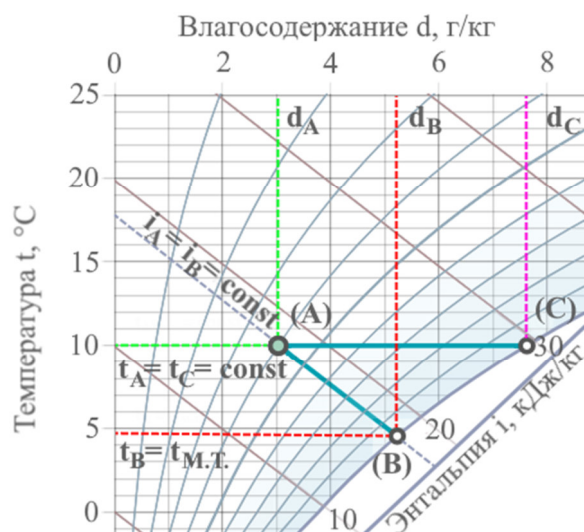


Рисунок 3.13 – Процесс увлажнения на I-d диаграмме влажного воздуха

Для описания процесса изотермического увлажнения составлена структурная схема, представленная на рисунке 3.14. Входными параметрами модели являются начальная температура ( $t$ ) в градусах Цельсия и влагосодержание ( $d$ ) в г/кг<sub>с.в.</sub> и прирост влагосодержания ( $d\_increase$ ) в г/кг<sub>с.в.</sub>. Выходными параметрами температура ( $t\_out$ ) в градусах Цельсия и влагосодержание ( $d\_out$ ) в г/кг<sub>с.в.</sub>. Данная модель учитывает ограничения по влагосодержанию, аналогичные схеме 3.8.

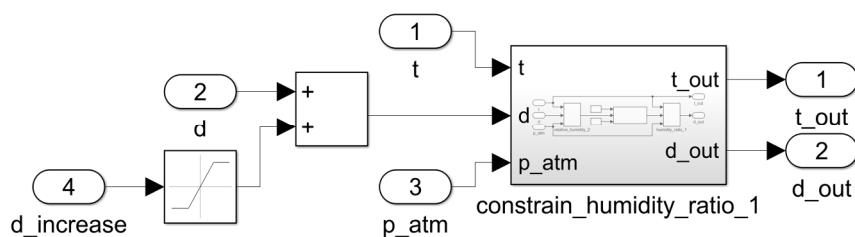


Рисунок 3.14 – Структурная схема изотермического увлажнения

Для описания процесса адиабатического увлажнения составлена структурная схема, представленная на рисунке 3.15. Входными параметрами модели являются начальная температура ( $t$ ) в градусах Цельсия и

влажностное содержание ( $d$ ) в г/кг<sub>с.в.</sub> и прирост влагосодержания ( $d\_increase$ ) в г/кг<sub>с.в.</sub>. Выходными параметрами температура ( $t\_out$ ) в градусах Цельсия и влагосодержание ( $d\_out$ ) в г/кг<sub>с.в.</sub>. Данная модель осуществляет поиск параметров соответствующих температуре мокрого термометра аналогично схеме 3.12.

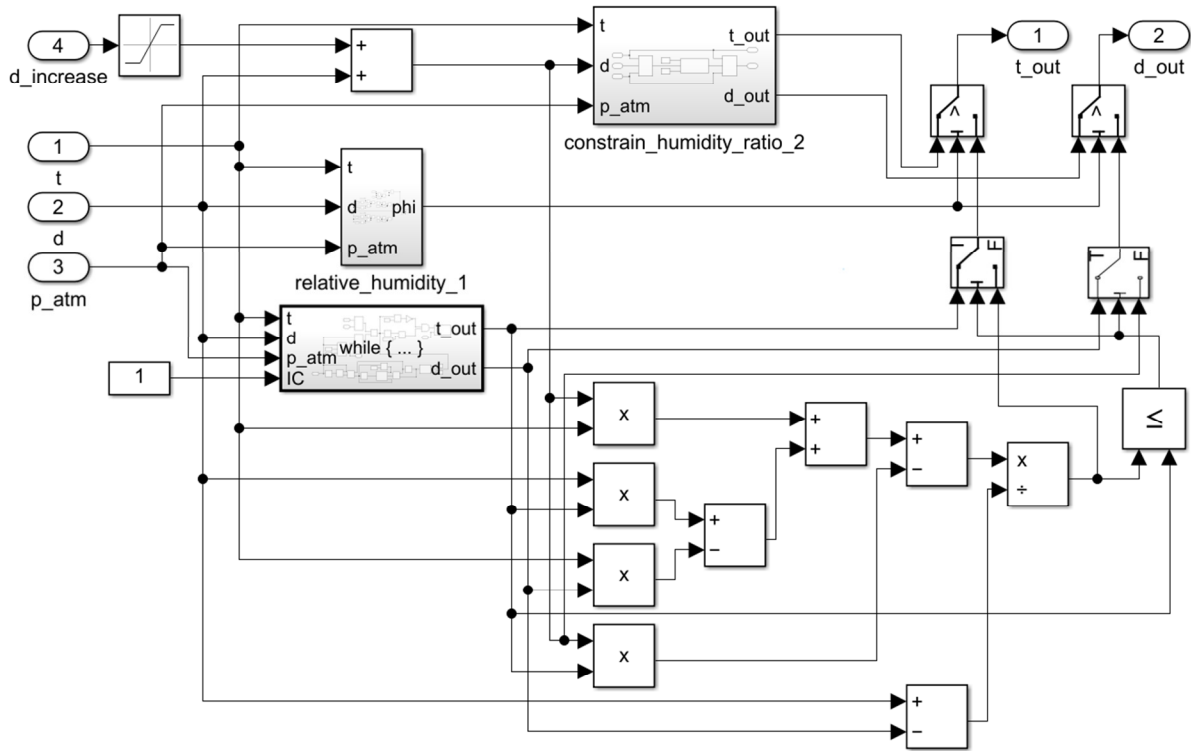


Рисунок 3.15 – Структурная схема адиабатического увлажнения

Для проверки правильности расчетов теоретических моделей проведены эксперименты по адиабатическому увлажнению (рисунки 3.16-3.17) и нагреву (рисунки 3.18-3.19) одной секции установки УПОР-М.

Увлажнение с использованием ультразвуковых увлажнителей представляет собой адиабатический метод распыления воды. Результаты эксперимента для адиабатического увлажнения при начальных параметрах воздуха 17,46 °С и 3,78 г/кг влагосодержания и конечных параметрах воздуха 12,3, °С и 5,9 г/кг представлены на I-d диаграмме (рисунки 3.16). Для определения параметров воздушной смеси при изменении относительной влажности от  $\phi$  начального до  $\phi$  конечного была использована математическая модель процесса, полученные значения представлены I-d диаграмме. Красным

цветом показан отрезок, соединяющий начальные и конечные параметры воздуха, полученные с использованием математической модели, желтым цветом показаны результаты эксперимента. Отклонение теоретически рассчитанных значений от экспериментальных по температуре не превышает 2%, и 5% по влагосодержанию.

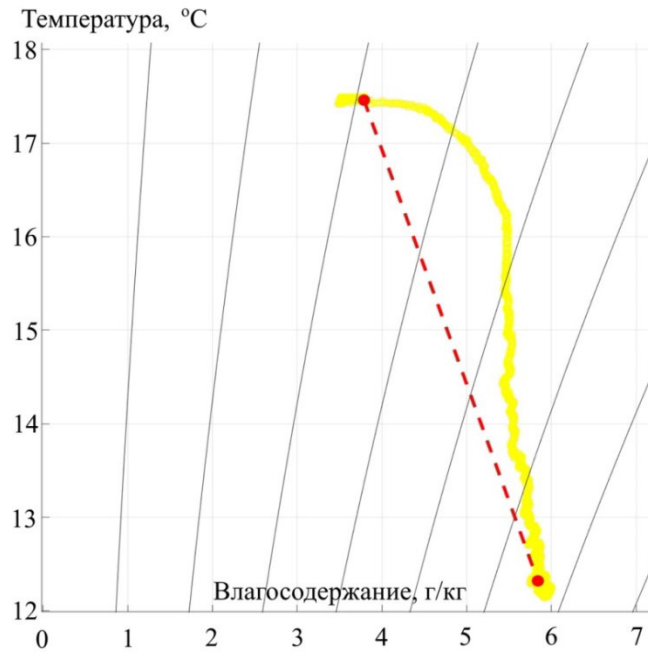


Рисунок 3.16 – Графический интерфейс модуля расчета параметров id-диаграммы для адиабатического увлажнения

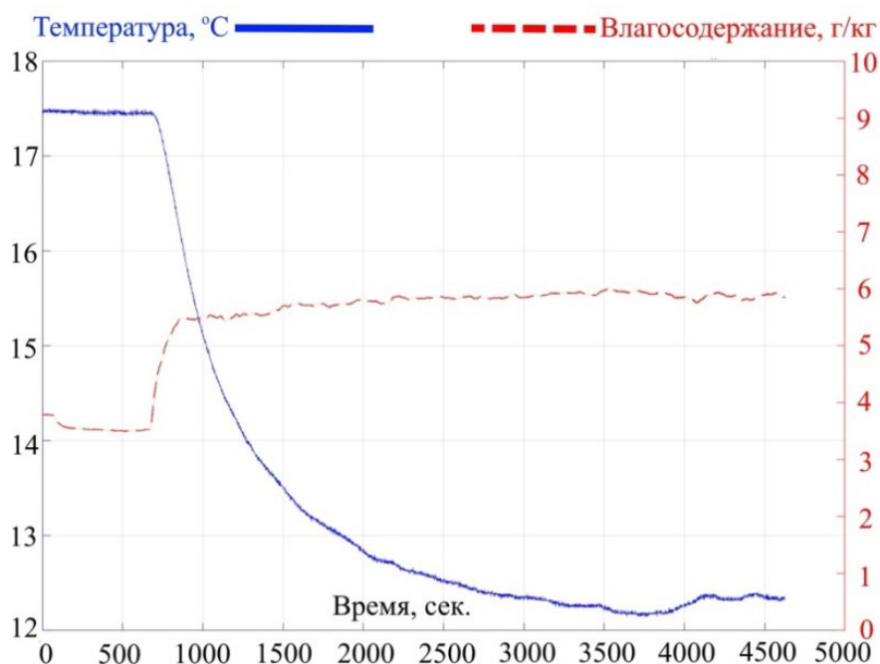


Рисунок 3.17 – Результаты эксперимента по адиабатическому увлажнению

При проведении эксперимента нагреватель был выключен, вытяжной вентилятор включен на 100 % производительности, при этом увлажнитель включен на 100% производительности. Результаты эксперимента представлены на рисунке 3.17. Результаты показали соответствие теоретического описания процесса адиабатического увлажнения.

Результаты эксперимента для нагрева при начальных параметрах воздуха 18,42 °С и 3,78 г/кг влагосодержания и конечных параметрах воздуха 26,5 °С и 4 г/кг влагосодержания представлены на I-d диаграмме (рисунок 3.18). Для определения параметров воздушной смеси после операции нагрева или охлаждения была использована математическая модель процесса, полученные значения представлены на I-d диаграмме. Красным цветом показан отрезок, соединяющий начальные и конечные параметры воздуха, полученные с использованием математической модели, желтым цветом показаны результаты эксперимента. Отклонение теоретически рассчитанных значений от экспериментальных по температуре и влагосодержанию не превышает 1%.

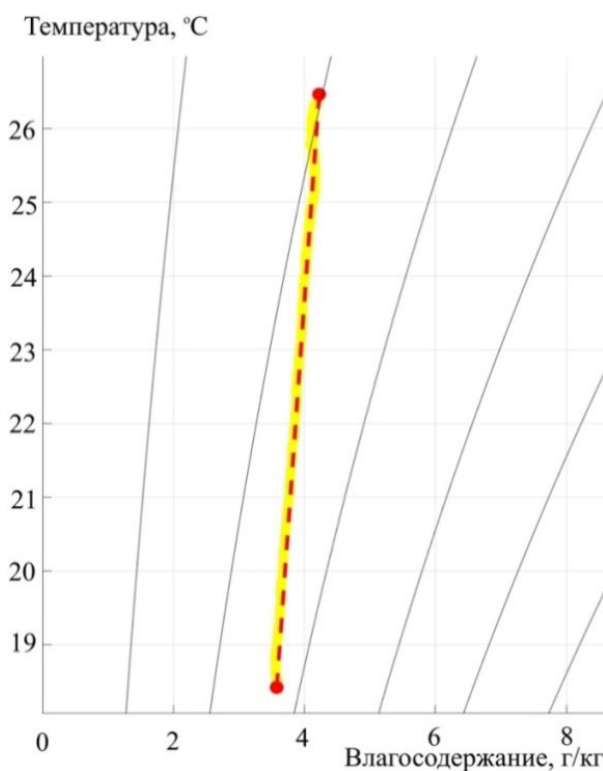


Рисунок 3.18 – Графический интерфейс модуля расчета параметров i-d диаграммы для процесса нагрева или охлаждения

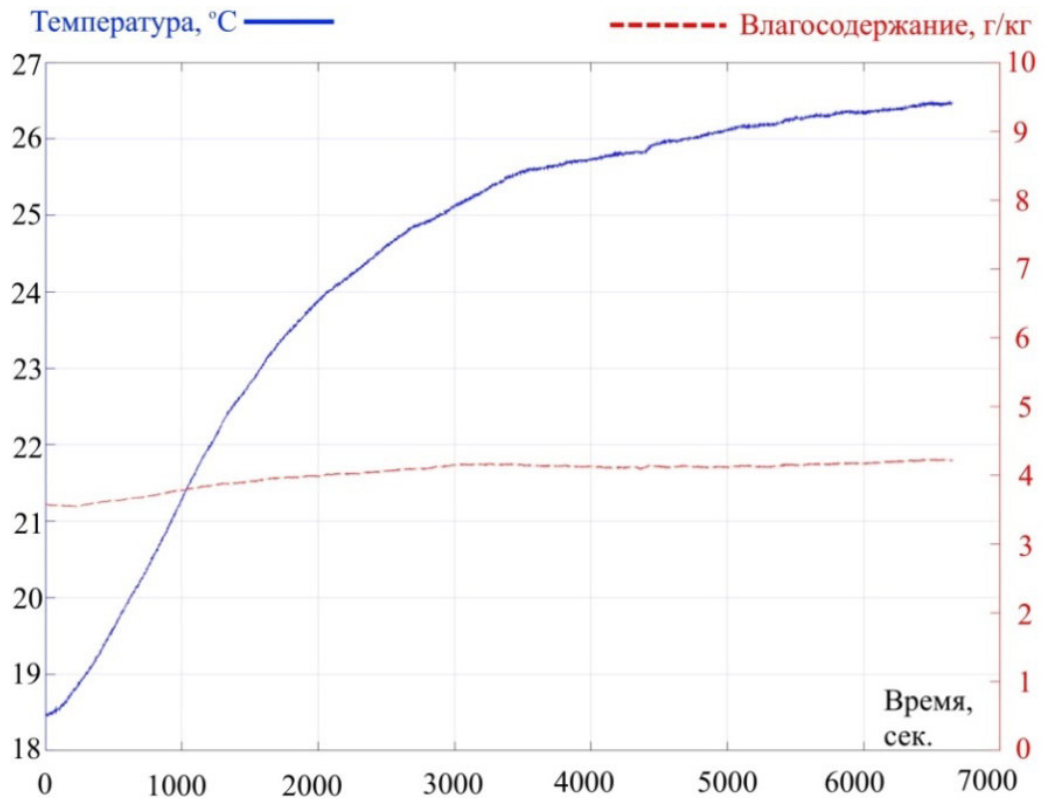


Рисунок 3.19 – Результаты эксперимента по нагреву

При проведении эксперимента нагреватель был включен на 100% мощности (250Вт), вытяжной вентилятор включен на 100% производительности, а увлажнитель выключен. Результаты эксперимента представлены на рисунке 3.19. Результаты показали соответствие теоретического описания процесса нагрева, полученного с применением I-d диаграммы. Также результаты экспериментов подтверждены веб приложениями I-d диаграмм других авторов.

Анализ результатов экспериментов по увлажнению и нагреву показывает более слабую зависимость влагосодержания от изменения температуры при нагреве, чем относительная влажность. Использование данной закономерности позволяет реализовать управления технологическими процессами обезвоживания сырья по влагосодержанию. Такой подход позволит избежать сильной взаимосвязанности контуров управления температуры и влажности. Отклонение результатов модели от экспериментальных данных не превышает 5 %.

### 3.2 Исследование теоретической модели тепловлажностных процессов внутри секции сушки

Секция сушки малогабаритной установки обладает малыми размерами по сравнению с промышленными установками (0,4×0,4×0,6 м), теплоизолированным корпусом, низким потреблением электроэнергии по сравнению с промышленными установками, регулируемой скоростью потока сушильного агента в диапазоне от 0 до 2,5 м/с, наличием системы рециркуляции теплоносителя, управлением температурой, контролем относительной влажности входящего воздуха и циркулирующего теплоносителя в установке, наличием средств учета затрат электроэнергии, возможностью сбора и архивации параметров технологического процесса [39].

Математическая модель секции сушки как объекта регулирования по температуре и влагосодержанию должна описывать связи параметров по каналам:

- температура приточного воздуха ( $T_{\text{прит.}}$ ) – температура воздуха в секции ( $T_{\text{кам.}}$ );
- влагосодержание приточного воздуха ( $d_{\text{прит.}}$ ) – влагосодержание воздуха в секции ( $d_{\text{кам.}}$ ).

При выводе математической модели, описывающей динамические свойства секции, использованы уравнения тепловлажностного баланса. В этой работе не рассматривались члены с пренебрежимо малым взаимодействием в общем балансе.

По каналу «температура приточного воздуха – температура воздуха в камере» использовалось уравнение теплового баланса для секции. Секция обезвоживания рассматривалась как объект с сосредоточенными параметрами.

$$M_{\text{возд.кам.}} \cdot c_{\text{возд.}} \cdot \frac{dT_{\text{кам.}}}{dt} = G_{\text{прит.}} \cdot c_{\text{возд.}} \cdot (T_{\text{прит.}} - T_{\text{кам.}}) + Q_{\text{изб.}} \quad (3.14)$$



где  $M_{\text{возд.кам.}}$  – масса воздуха в камере, кг;

$c_{\text{возд.}}$  – удельная теплоемкость воздуха, кДж/(кг·°С);

$G_{\text{прит.}}$  – расход приточного воздуха, кг/с;

$T_{\text{кам.}}$  – температура воздуха в секции, °С;

$T_{\text{прит.}}$  – температура приточного воздуха, °С;

$Q_{\text{изб.}}$  – общие теплоизбытки в камере, кДж/с.

Теплоизбытки в секции из уравнения (3.14) определяются следующим образом:

$$Q_{\text{изб.}} = Q_{\text{огр.}} + Q_{\text{вн.}} + Q_{\text{инф.}}, \quad (3.15)$$

где  $Q_{\text{огр.}}$  – суммарные теплопритоки через ограждения, кДж/с;

$Q_{\text{вн.}}$  – суммарные внутренние теплопритоки, кДж/с;

$Q_{\text{инф.}}$  – тепло, вносимое воздухом при инфильтрации, кДж/с.

$$Q_{\text{огр.}} = \frac{F_{\text{огр.}}}{R_{\text{огр.}}} \cdot (T_{\text{кам.}} - T_{\text{нар.}}), \quad (3.16)$$

где  $F_{\text{огр.}}$  – площадь ограждающей конструкции, м<sup>2</sup>;

$R_{\text{огр.}}$  – сопротивление теплопередаче конструкции ограждения, м<sup>2</sup>·°С·с/кДж;

$T_{\text{кам.}}$  – температура воздуха в камере, °С;

$T_{\text{нар.}}$  – температура наружного воздуха, °С.

Величину сопротивления теплопередаче многослойного ограждения  $R_{\text{огр.}}$  определяют по формуле:

$$R_{\text{огр.}} = R_{\text{вн.}} + R_{\text{сл.}} + R_{\text{нар.}}, \quad (3.17)$$

где  $R_{\text{вн.}}$  – сопротивление теплопереходу у внутренней поверхности ограждения, м<sup>2</sup>·°С·с/кДж;

$R_{\text{сл.}}$  – суммарное термические сопротивления отдельных слоев ограждения, м<sup>2</sup>·°С·с/кДж;

$R_{нар.}$  – сопротивление теплопереходу у наружной поверхности ограждения,  $м^2 \cdot ^\circ C \cdot с / кДж$ .

Суммарные внутренние теплопритоки в секции из уравнения (3.15) определяются выражением:

$$Q_{вн.} = Q_{сыр.}, \quad (3.18)$$

где  $Q_{сыр.}$  – теплоприток от сырья,  $кДж/с$ .

Теплоприток от продукта определяется следующим образом:

$$Q_{сыр.} = M_{сыр.} \cdot c_{сыр.} \cdot (T_{сыр.} - T_{кам.}), \quad (3.19)$$

где  $M_{прод.}$  – масса сырья в секции,  $кг$ ;

$c_{прод.}$  – удельная теплоёмкость сырья,  $кДж/(кг \cdot ^\circ C)$ ;

$T_{сыр.}$  – температура сырья,  $^\circ C$ ;

$T_{кам.}$  – температура в секции,  $^\circ C$ .

Тепло, вносимое воздухом при инфильтрации, определяется по формуле:

$$Q_{инф.} = G_{инф.} \cdot c_{возд.} \cdot (T_{нар.} - T_{кам.}), \quad (3.20)$$

где  $G_{инф.}$  – расход инфильтрационного воздуха,  $кг/с$ ;

$c_{возд.}$  – удельная теплоёмкость воздуха,  $кДж/(кг \cdot ^\circ C)$ ;

$T_{нар.}$  – температура наружного воздуха,  $^\circ C$ ;

$T_{кам.}$  – температура воздуха в секции,  $^\circ C$ .

С учётом формул (3.14) – (3.30) уравнение (3.13) примет вид:

$$\begin{aligned} M_{возд.кам.} \cdot c_{возд.} \cdot \frac{dT_{кам.}}{d\tau} = & G_{прит.} \cdot c_{возд.} \cdot (T_{прит.} - T_{кам.}) + \\ & + \frac{F_{огр.}}{R_{огр.}} \cdot (T_{кам.} - T_{нар.}) + M_{сыр.} \cdot c_{сыр.} \cdot (T_{сыр.} - T_{кам.}) + \\ & + G_{инф.} \cdot c_{возд.} \cdot (T_{нар.} - T_{кам.}), \end{aligned} \quad (3.21)$$

После преобразований уравнение (3.21) представлено выражением:

$$\begin{aligned}
& \frac{M_{\text{возд.кам.}} \cdot c_{\text{возд.}}}{G_{\text{прит.}} \cdot c_{\text{возд.}} - \frac{F_{\text{огр.}}}{R_{\text{огр.}}} + M_{\text{сыр.}} \cdot c_{\text{сыр.}} + G_{\text{инф.}} \cdot c_{\text{возд.}}} \cdot \frac{dT_{\text{кам.}}}{d\tau} + T_{\text{кам.}} = \\
& = \frac{G_{\text{прит.}} \cdot c_{\text{возд.}}}{G_{\text{прит.}} \cdot c_{\text{возд.}} - \frac{F_{\text{огр.}}}{R_{\text{огр.}}} + M_{\text{сыр.}} \cdot c_{\text{сыр.}} + G_{\text{инф.}} \cdot c_{\text{возд.}}} \cdot T_{\text{прит.}} + \\
& + \frac{M_{\text{сыр.}} \cdot c_{\text{сыр.}}}{G_{\text{прит.}} \cdot c_{\text{возд.}} - \frac{F_{\text{огр.}}}{R_{\text{огр.}}} + M_{\text{сыр.}} \cdot c_{\text{сыр.}} + G_{\text{инф.}} \cdot c_{\text{возд.}}} \cdot T_{\text{сыр.}} + \\
& + \frac{G_{\text{инф.}} \cdot c_{\text{возд.}} - \frac{F_{\text{огр.}}}{R_{\text{огр.}}}}{G_{\text{прит.}} \cdot c_{\text{возд.}} - \frac{F_{\text{огр.}}}{R_{\text{огр.}}} + M_{\text{сыр.}} \cdot c_{\text{сыр.}} + G_{\text{инф.}} \cdot c_{\text{возд.}}} \cdot T_{\text{нар.}}
\end{aligned} \tag{3.22}$$

При введении обозначений  $T_{\text{п.в.кам.}}$ ,  $k_{\text{к.п.прит.}}$ ,  $k_{\text{к.п.сыр.}}$ ,  $k_{\text{к.п.нар.}}$ , уравнение (3.22) примет вид:

$$\begin{aligned}
T_{\text{п.в.кам.}} \cdot \frac{dT_{\text{кам.}}}{d\tau} + T_{\text{кам.}} \\
= k_{\text{к.п.прит.}} \cdot T_{\text{прит.}} + k_{\text{к.п.сыр.}} \cdot T_{\text{сыр.}} + k_{\text{к.п.нар.}} \cdot T_{\text{нар.}}
\end{aligned} \tag{3.23}$$

где  $T_{\text{п.в.кам.}}$  – постоянная времени секции;

$k_{\text{к.п.прит.}}$ ,  $k_{\text{к.п.сыр.}}$ ,  $k_{\text{к.п.нар.}}$  – коэффициенты передачи по соответствующим каналам.

Применив к уравнению (3.23) преобразование Лапласа при нулевых начальных условиях получим передаточную функцию секции по регулирующему воздействию  $W_{\text{кам.темп.}}(p)$  и передаточную функцию секции по возмущающим воздействиям  $W_{\text{кам.сыр.}}(p)$ ,  $W_{\text{кам.нар.}}(p)$ :

$$W_{\text{кам.темп.}}(p) = \frac{k_{\text{к.п.прит.}}}{T_{\text{п.в.кам.}} p + 1} \tag{3.24}$$

$$W_{\text{кам.нар.}}(p) = \frac{k_{\text{к.п.нар.}}}{T_{\text{п.в.кам.}} p + 1} \tag{3.25}$$

$$W_{\text{кам.сыр.}}(p) = \frac{k_{\text{к.п.сыр.}}}{T_{\text{п.в.кам.}} p + 1}. \quad (3.26)$$

После подстановки числовых значений в уравнения (3.24)-(3.26) получены следующие теоретические передаточные функции для незагруженной продуктом камеры:

$$W_{\text{кам.темп.}}(p) = \frac{1.023}{1666.48p + 1}.$$

$$W_{\text{кам.нар.}}(p) = \frac{-0.023}{1666.48p + 1}.$$

$$W_{\text{кам.сыр.}}(p) = 0.$$

При выводе уравнения математической модели, описывающего динамические свойства секции по каналу «влагосодержание приточного воздуха — влагосодержание воздуха в секции» использовалось уравнение материального баланса (баланса влаги) в помещении:

$$M_{\text{возд.кам.}} \cdot \frac{d(d_{\text{кам.}})}{d\tau} = G_{\text{прит.}} \cdot (d_{\text{прит.}} - d_{\text{кам.}}) + G_{\text{инф.}} \cdot (d_{\text{нар.}} - d_{\text{кам.}}) + G_{\text{увл.}} \cdot (d_{\text{увл.}} - d_{\text{кам.}}) + W, \quad (3.27)$$

где  $M_{\text{возд.кам.}}$  — масса воздуха в камере, кг;

$G_{\text{прит.}}$  — расход приточного воздуха, кг/с;

$G_{\text{инф.}}$  — расход инфильтрующего воздуха, кг/с;

$G_{\text{увл.}}$  — расход воздуха через увлажнитель, кг/с;

$d_{\text{прит.}}$  — влагосодержание приточного воздуха, г/кг;

$d_{\text{кам.}}$  — влагосодержание воздуха в камере, г/кг;

$d_{\text{нар.}}$  — влагосодержание инфильтрующего воздуха, г/кг;

$d_{\text{увл.}}$  — влагосодержание воздуха после увлажнителя, г/кг;

$W$  — суммарный прирост влаги, г/с.

Суммарный прирост влажности определяется по формуле:

$$W = 833 \cdot (W_{\text{сыр.}} + W_{\text{др.}}) = 833 \cdot W', \quad (3.28)$$

где 833 — коэффициент, который учитывает плотность воздуха и другие величины;

$W_{\text{сыр.}}$  — прирост влажности в секции от сырья, г/с;

$W_{\text{др.}}$  — прирост влажности в секции от других факторов, г/с;

$W'$  — сумма приростов влажности, г/с;

С учётом формулы (3.28) и после преобразований уравнение (3.27) примет вид:

$$\begin{aligned} & \frac{M_{\text{возд.кам.}}}{(G_{\text{прит.}} + G_{\text{инф.}} + G_{\text{увл.}})} \cdot \frac{d(d_{\text{кам.}})}{d\tau} + d_{\text{кам.}} = \\ & = \frac{G_{\text{прит.}}}{(G_{\text{прит.}} + G_{\text{инф.}} + G_{\text{увл.}})} \cdot d_{\text{прит.}} + \frac{G_{\text{инф.}}}{(G_{\text{прит.}} + G_{\text{инф.}} + G_{\text{увл.}})} \cdot d_{\text{нар.}} + \\ & + \frac{G_{\text{увл.}}}{(G_{\text{прит.}} + G_{\text{инф.}} + G_{\text{увл.}})} \cdot d_{\text{увл.}} + \frac{833 \cdot W'}{(G_{\text{прит.}} + G_{\text{инф.}} + G_{\text{увл.}})} \end{aligned} \quad (3.29)$$

При введении обозначений  $T_{\text{п.в.кам.d}}$ ,  $k_{\text{к.п.прит.d}}$ ,  $k_{\text{к.п.нар.d}}$ ,  $k_{\text{к.п.увл.d}}$ ,  $k_{\text{к.п.прирост.d}}$ , уравнение (16) представлено в виде формулы:

$$\begin{aligned} & T_{\text{п.в.кам.d}} \cdot \frac{d(d_{\text{кам.}})}{d\tau} + d_{\text{кам.}} = \\ & = k_{\text{к.п.прит.d}} \cdot d_{\text{прит.}} + k_{\text{к.п.нар.d}} \cdot d_{\text{нар.}} + k_{\text{к.п.увл.d}} \cdot d_{\text{увл.}} + \\ & + k_{\text{к.п.прирост.d}} \cdot W', \end{aligned} \quad (3.30)$$

где  $T_{\text{п.в.кам.d}}$  — постоянная времени секции;

$k_{\text{к.п.прит.d}}$ ,  $k_{\text{к.п.нар.d}}$ ,  $k_{\text{к.п.прирост.d}}$  — коэффициенты передачи по соответствующим каналам.

Применив к уравнению (330) преобразование Лапласа при нулевых начальных условиях получим передаточные функции передаточные функции

секции по регулируемому воздействию  $W_{\text{кам.темп.d}}(p)$ ,  $W_{\text{кам.прирост.d}}(p)$ ; передаточную функцию секции по возмущающему воздействию  $W_{\text{кам.нар.d}}(p)$ :

$$W_{\text{кам.темп.d}}(p) = \frac{k_{\text{к.п.прит.d}}}{T_{\text{п.в.кам.d}}p + 1}. \quad (3.31)$$

$$W_{\text{кам.нар.d}}(p) = \frac{k_{\text{к.п.нар.d}}}{T_{\text{п.в.кам.d}}p + 1}. \quad (3.32)$$

$$W_{\text{кам.увл.d}}(p) = \frac{k_{\text{к.п.увл.d}}}{T_{\text{п.в.кам.d}}p + 1}. \quad (3.33)$$

$$W_{\text{кам.прирост.d}}(p) = \frac{W_{\text{кам.прирост.d}}}{T_{\text{п.в.кам.d}}p + 1}. \quad (3.34)$$

После подстановки числовых значений в уравнения (3.31)–(3.34) были получены следующие теоретические передаточные функции для незагруженной продуктом секции:

$$W_{\text{кам.темп.d}}(p) = \frac{0.091}{167.21p + 1}.$$

$$W_{\text{кам.нар.d}}(p) = \frac{0.00015}{167.21p + 1}.$$

$$W_{\text{кам.увл.d}}(p) = \frac{0.91}{167.21p + 1}.$$

$$W_{\text{кам.прирост.d}}(p) = 0.$$

Из теории тепловлажностной обработки воздуха известно, что температура оказывает влияние на влагосодержание, ограничивая максимальное влагосодержание, а при адиабатическом увлажнении, увеличение влагосодержания оказывает влияние на температуру, понижая ее. Учтем эти каналы, введя передаточные функции  $W_{\text{св.1}}(p)$  и  $W_{\text{св.2}}(p)$ . Коэффициенты передачи этих передаточных функций, находятся из уравнений взаимосвязи параметров влажного воздуха.

С учётом полученных передаточных функций (3.24)–(3.26), (3.31)–(3.34) и введённых взаимосвязей контуров  $W_{св.1}(p)$  и  $W_{св.2}(p)$ , структурная схема секции сушки как объекта регулирования будет иметь вид, показанный на рисунке 3.20.

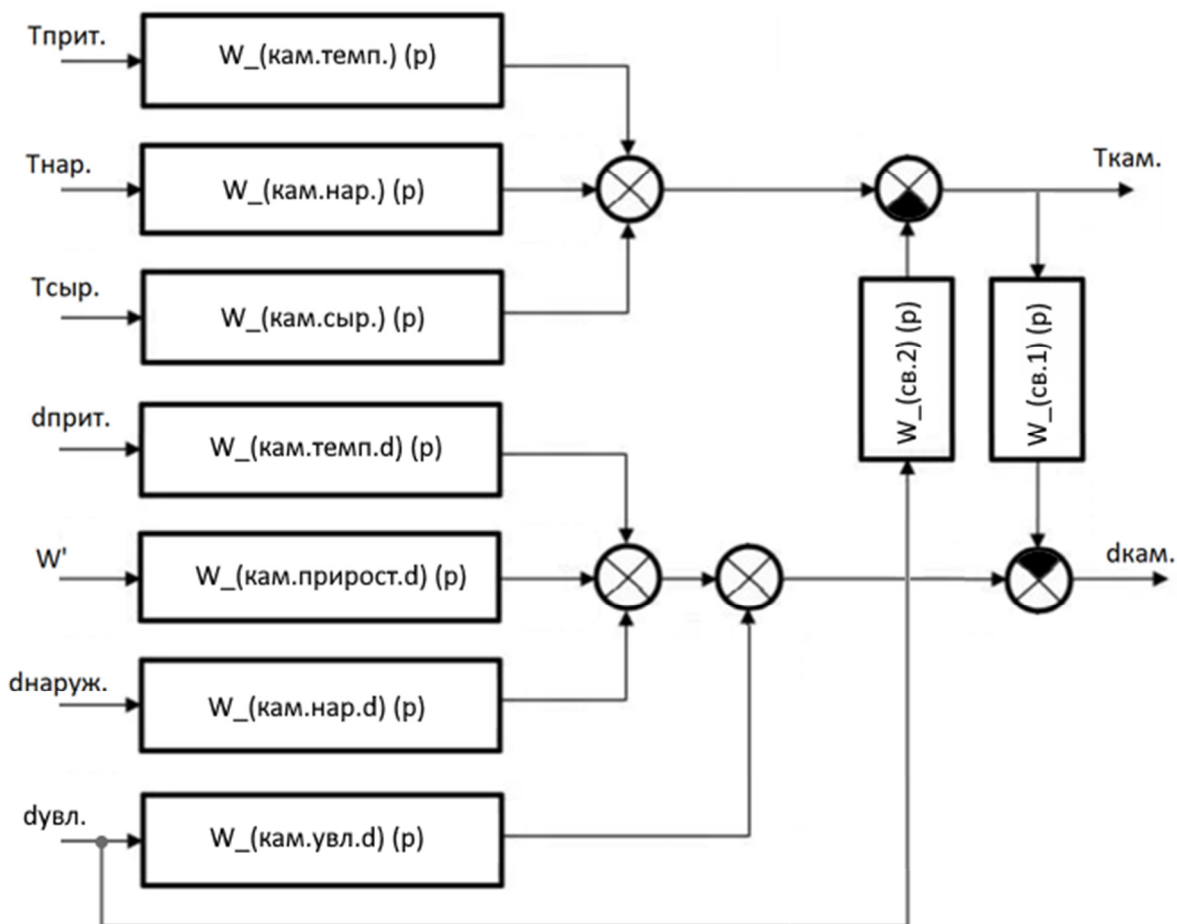


Рисунок 3.20 – Структурная схема камеры сушки как объекта регулирования

С учетом полученной теоретической модели секции сушки, в данном исследовании создана экспериментальная модель и проведено сравнение между теоретическими и экспериментальными данными.

Экспериментальная модель получена на основании результатов проведенных экспериментов с одним входом и выходом и несколькими входами и выходами в одной секции установки:

- эксперимент для изучения внутренней температуры;
- эксперимент для изучения внутреннего влагосодержания;

– эксперимент для изучения связи внутренней температуры и влагосодержания.

Коэффициенты передаточных функций были получены из экспериментальных данных с использованием программного продукта Autocont Lite:SeekerC.

Параметры передаточной функции по изменению температуры в секции установки получены из эксперимента при исходных значениях температуры 18,61 °С и влагосодержания 4,2 г/кг. Вид переходного процесса эксперимента (показан черным цветом) и модели (показан зеленым цветом) при ступенчатом воздействии (показан синим цветом) представлен на рисунке 3.21. Максимальное отклонение значений модели от экспериментальных данных не превышает 5%.

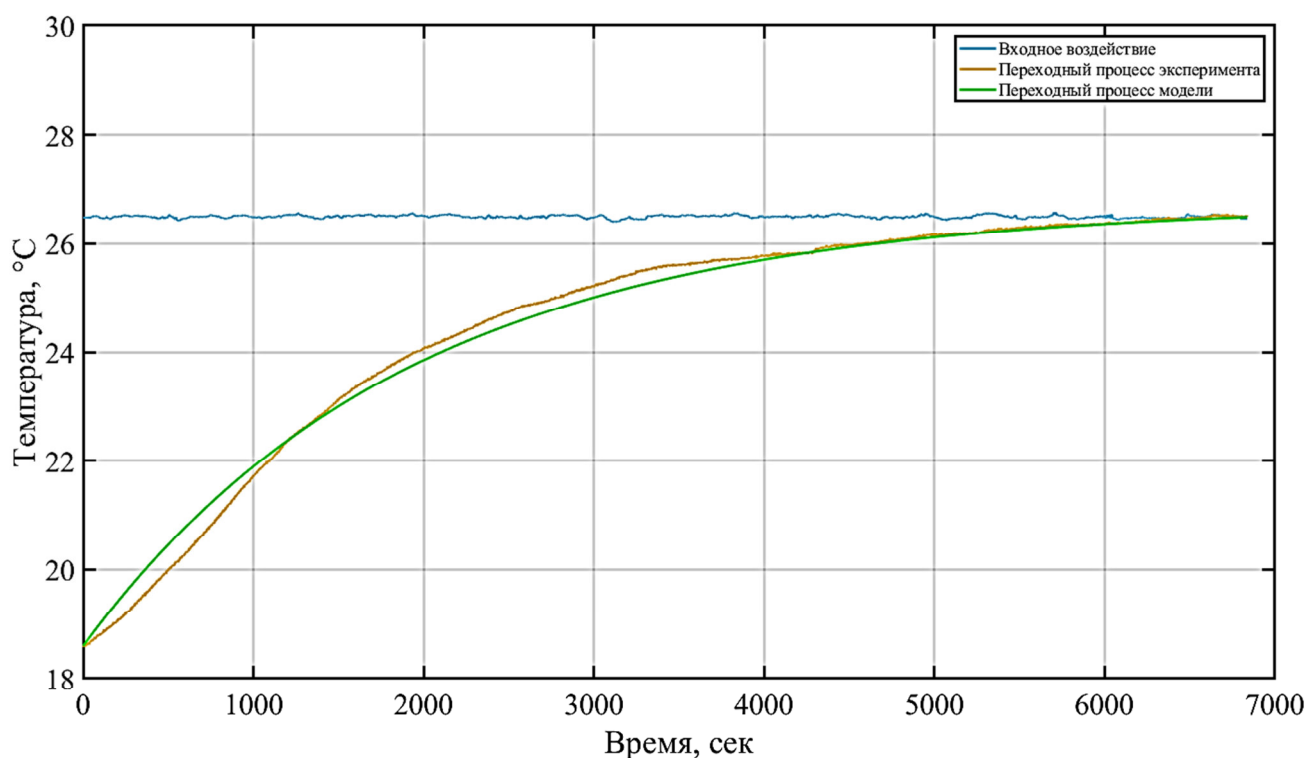


Рисунок 3.21 – Графики переходных процессов при определении коэффициентов экспериментальной передаточной функции по температуре

Передаточная функция с экспериментально полученными параметрами имеет вид:



$$W_{\text{кам.темп.}}(p) = \frac{1}{1923.46p + 1}$$

Параметры передаточной функции по изменению влагосодержания в секции получены из эксперимента при исходных значениях температуры 17,5 °С и влагосодержания 3,77 г/кг. Вид переходного процесса эксперимента (показан черным цветом) и модели (показан зеленым цветом) при ступенчатом воздействии (показан синим цветом) представлен на рисунке 3.22. Максимальное отклонение значений модели от экспериментальных данных не превышает 10%.

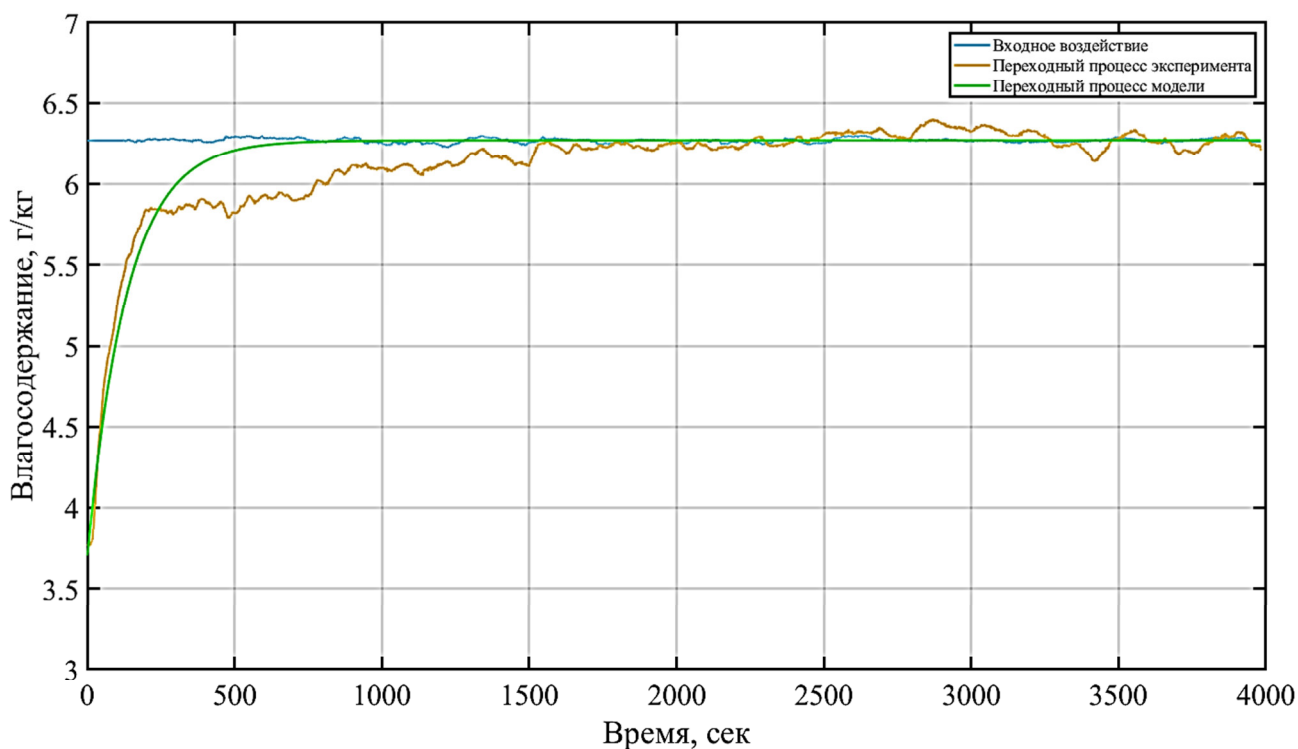


Рисунок 3.22 – Графики переходных процессов при определении коэффициентов экспериментальной передаточной функции по влагосодержанию

Передаточная функция с экспериментально полученными параметрами имеет вид:

$$W_{\text{кам.темп.d}}(p) = \frac{1}{134.372p + 1}$$

Секция сушки, представляет собой многосвязный объект. Зависимость между температурой и влагосодержанием означает, что управление таким объектом может быть сложной задачей, поскольку изменение регулирующего воздействия по одному каналу приводит к изменению в другом.

На рисунке 3.23 представлен переходный процесс при изменении воздействий по исследуемым каналам, показывающий влияние контуров управления друг на друга в секции сушки.

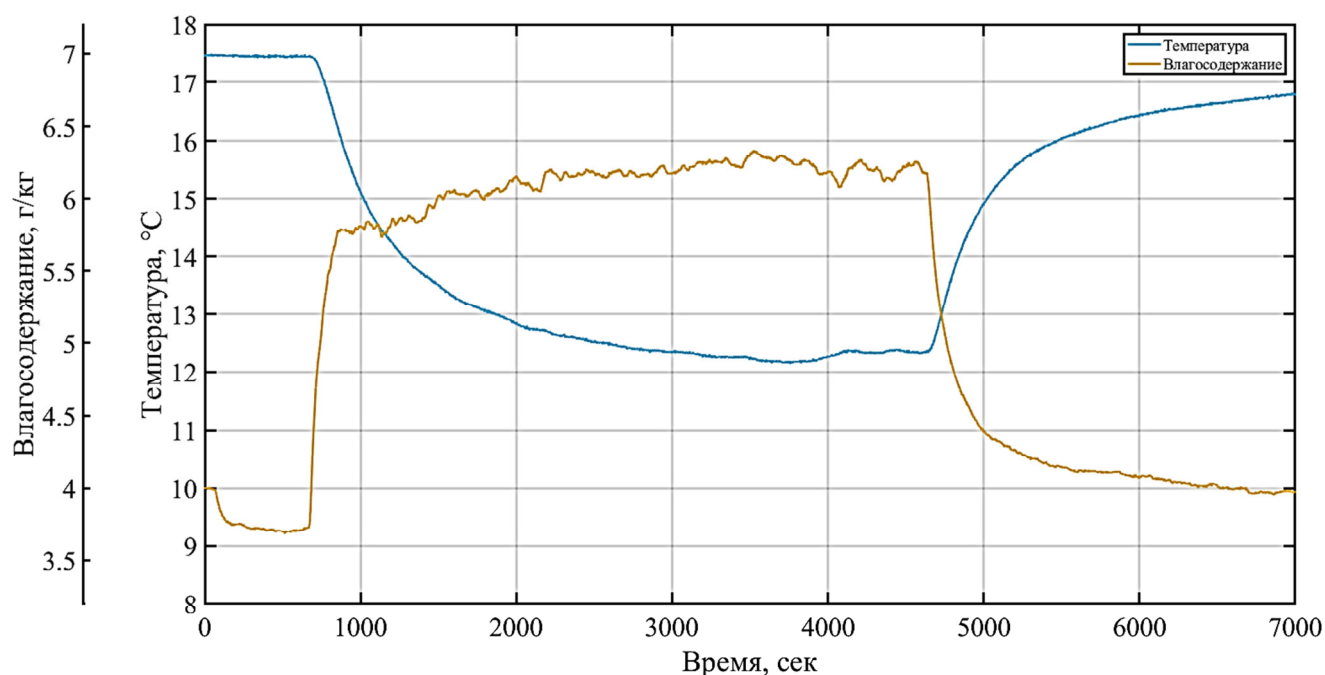


Рисунок 3.23 – Переходные процессы при изменении воздействий

Из теории тепловлажностной обработки влажного воздуха известно и экспериментально подтверждено, что нагрев и охлаждение воздуха в секции происходит без изменения его влагосодержания. Случай охлаждения с конденсацией пара и уменьшением влагосодержания не рассматривался. Таким образом, связь по каналу «температура приточного воздуха ( $T_{\text{прит.}}$ ) — изменение влагосодержания воздуха в секции ( $d_{\text{конд.}}$ )» в данном исследовании исключена.

Передаточная функция с экспериментально полученными параметрами  $W_{\text{св.2}}(p)$  по каналу «влагосодержание увлажненного воздуха ( $d_{\text{увл.}}$ ) — изменение температуры в секции ( $T_{\text{увл.}}$ )» получена из эксперимента (рисунок 3.24) и имеет вид:

$$W_{\text{св.2}}(p) = \frac{2.48}{150.067p + 1}$$

Вид переходного процесса эксперимента (показан оранжевым цветом) и модели (показан зеленым цветом) при воздействии (показан синим цветом), являющимся функцией от влагосодержания представлен на рисунке 3.24. Максимальное отклонение значений модели от экспериментальных данных не превышает 8%.

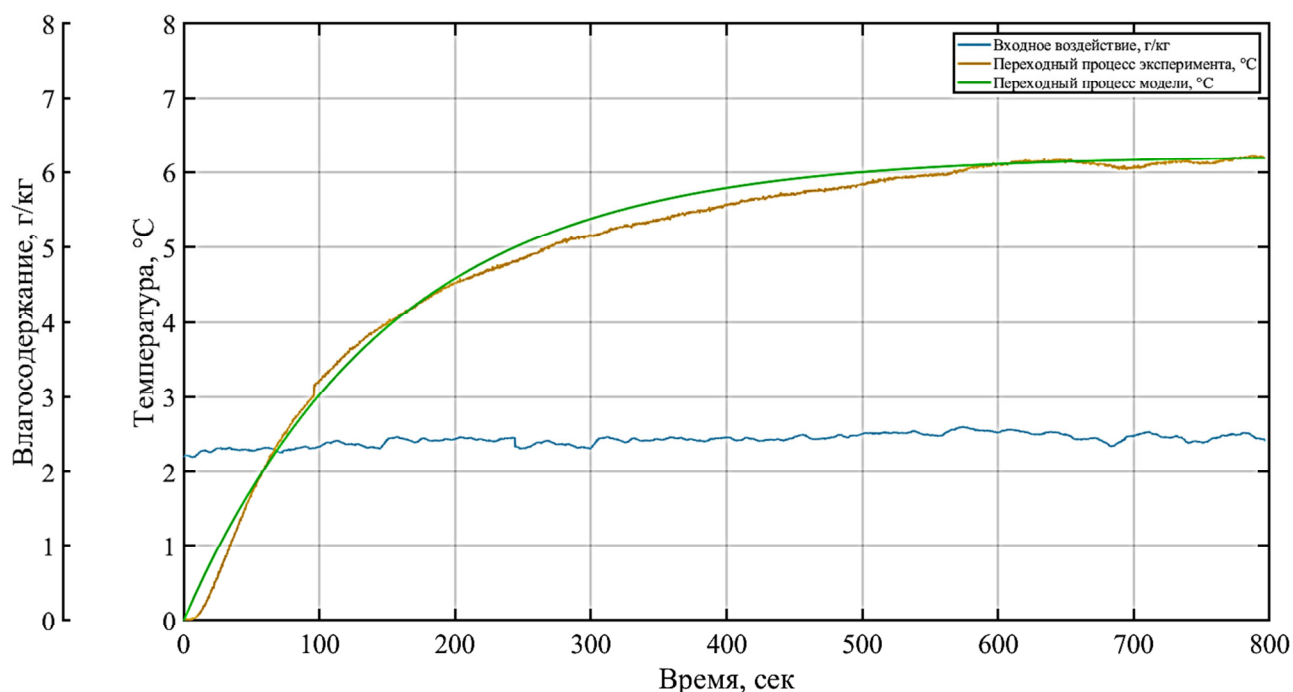


Рисунок 3.24 – Графики переходных процессов при определении коэффициентов экспериментальной передаточной функции  $W_{\text{св.2}}(p)$

Сравнение переходных процессов, полученных с применением теоретической и экспериментальной модели, проведено в среде MatLab в соответствии со структурной схемой, представленной на рисунке 3.25. Сопоставление трех переходных процессов (рисунки 3.27 – 3.28) проводилось как последовательные события. На первом этапе проводилось моделирование нагрева до температуры 18,5 °C с увеличением влагосодержания до 4 г/кг. На втором этапе (с 10000 сек) происходил нагрев секции от 18,5 до 26,5 °C. На

третьем этапе (с 20000 сек) проводилось моделирование увлажнения с изменением влагосодержания от 4 до 6 г/кг (рисунок 3.29).

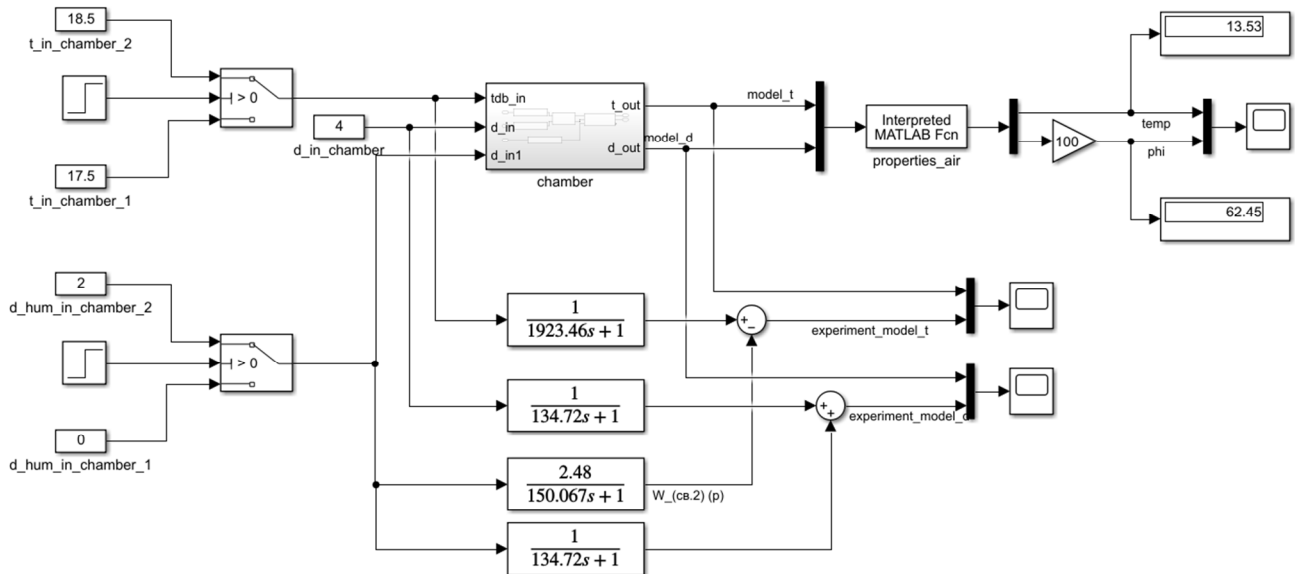


Рисунок 3.25 – Структурная схема сравнения переходных процессов, полученных с применением теоретической и экспериментальной модели

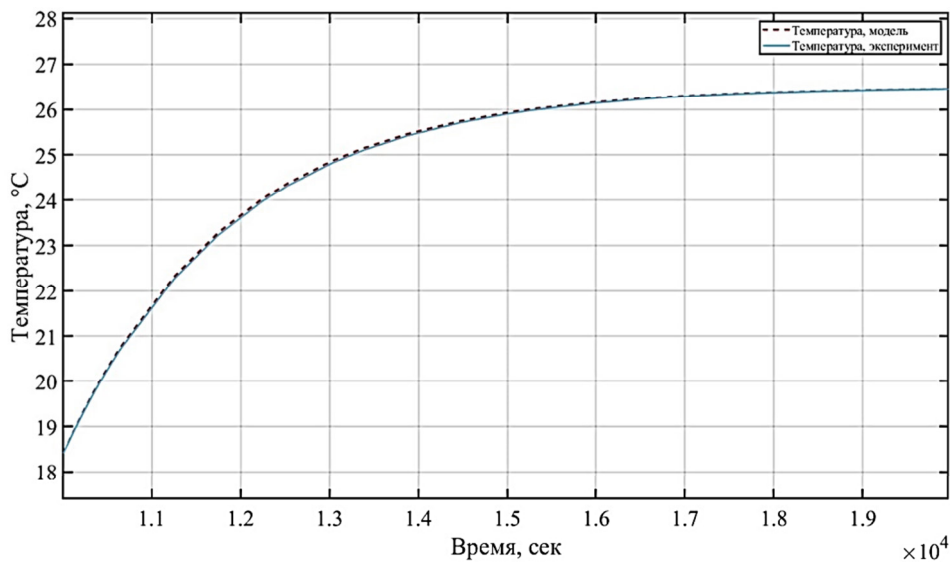


Рисунок 3.26 – Результаты сравнения переходных процессов теоретической и экспериментальной моделей по каналу «температура приточного воздуха ( $T_{\text{прит.}}$ ) – температура воздуха в секции ( $T_{\text{кам.}}$ )»

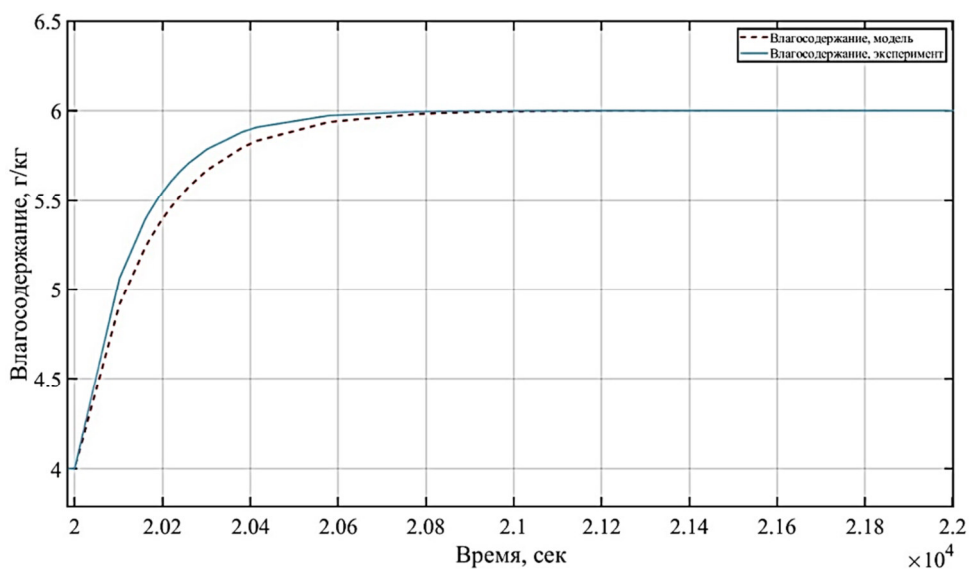


Рисунок 3.27 – Результаты сравнения переходных процессов теоретической и экспериментальной моделей по каналу «влагосодержание приточного воздуха ( $d_{\text{прит.}}$ ) – влагосодержание воздуха в секции ( $d_{\text{кам.}}$ )

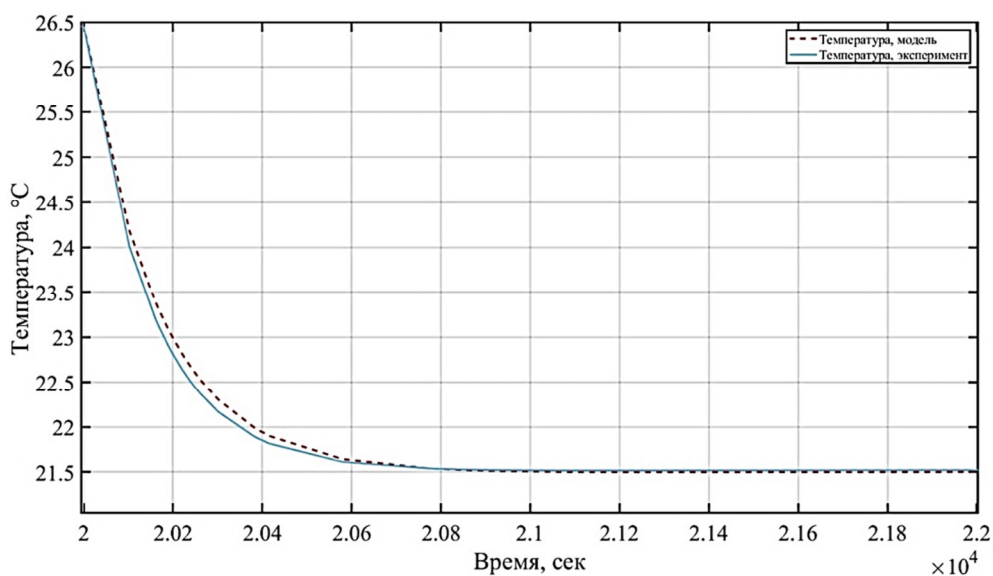


Рисунок 3.28 – Результаты сравнения переходных процессов теоретической и экспериментальной моделей по каналу «влагосодержание увлажненного воздуха ( $d_{\text{увл.}}$ ) – изменение температуры в секции ( $T_{\text{увл.}}$ )

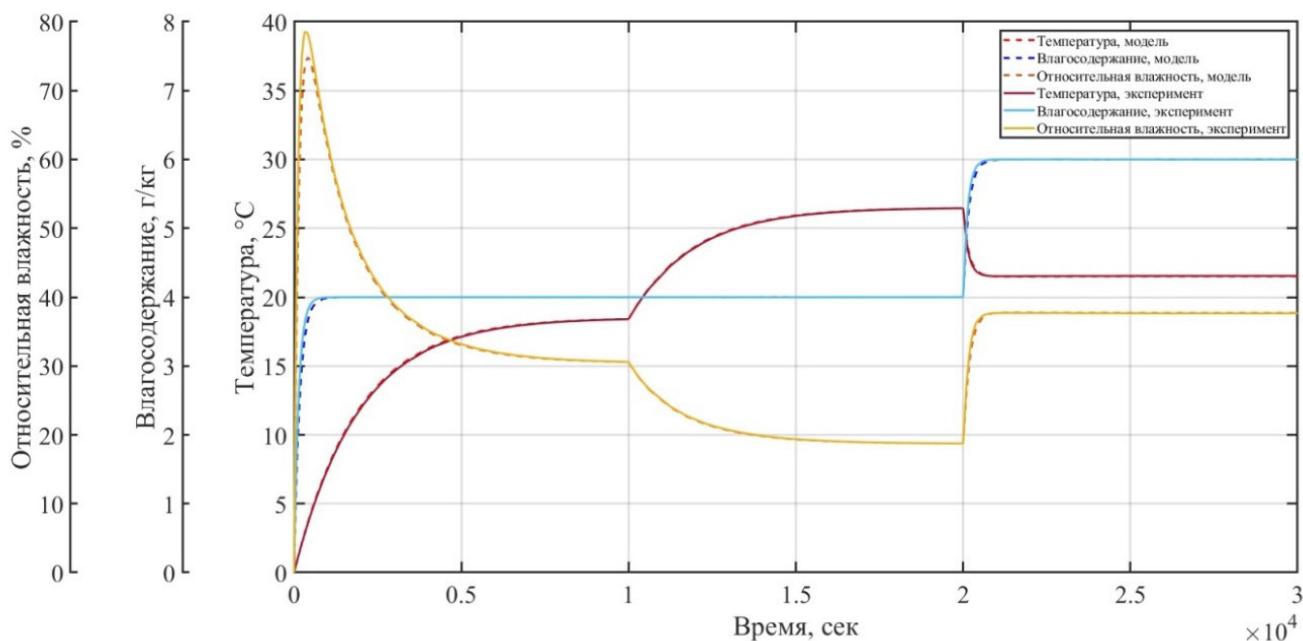


Рисунок 3.29 – Графики экспериментального исследования температурных и влажностных процессов

Результаты сравнения графиков переходных процессов теоретической и экспериментальной моделей показывают высокую степень близости полученных данных. Максимальное отклонение значений модели от экспериментальных данных не превышает 5% по температуре и 10% по влагосодержанию.

По аналогичной методике были получены модели изменения состояния сушильного агента при прохождении через теплообменные устройства [3], на основании данных моделей были построены функциональные блоки для численного моделирования тепловлажностных процессов представленные на рисунке 3.30.

Результаты исследования позволяют проводить численное моделирование тепловлажностных процессов внутри секции сушки и элементах системы. Синтез регулятора для установки позволит получить оптимальные по качеству управления настройки системы. Совмещение результатов моделирования процессов в сушильной секции с моделями обезвоживания сырья представляет возможность получить оптимальные по затратам энергии и времени режимы обезвоживания. Совокупное моделирование процессов обезвоживания с экспериментально полученными результатами сушки позволит

провести цифровую сертификацию режимов и использовать их для промышленных сушильных установок.

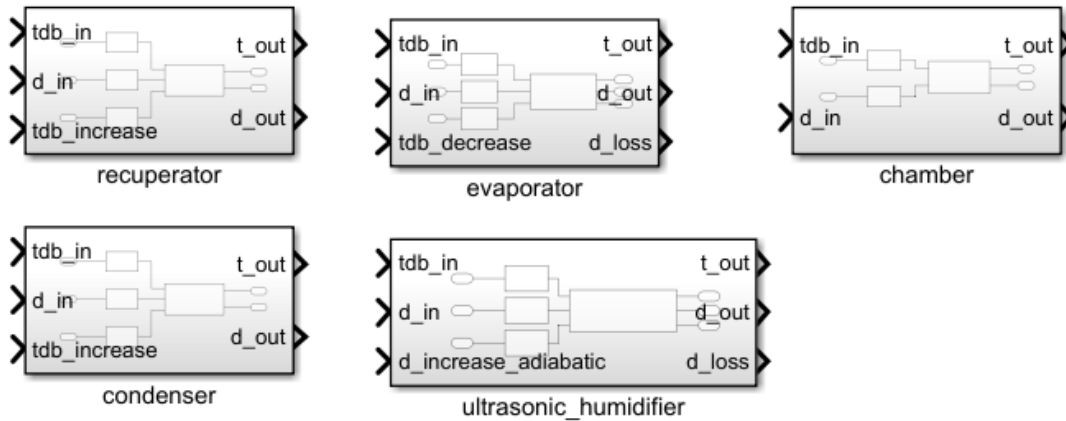


Рисунок 3.30 – Функциональные блоки для численного моделирования

### 3.3 Численное моделирование и синтез регуляторов системы автоматического управления

Моделирование предлагаемой системы автоматического управления процессом холодной сушки гидробионтов по температуре и влагосодержанию проводилось в среде численного моделирования. Структурная схема при моделировании процесса представлена на рисунке 3.31

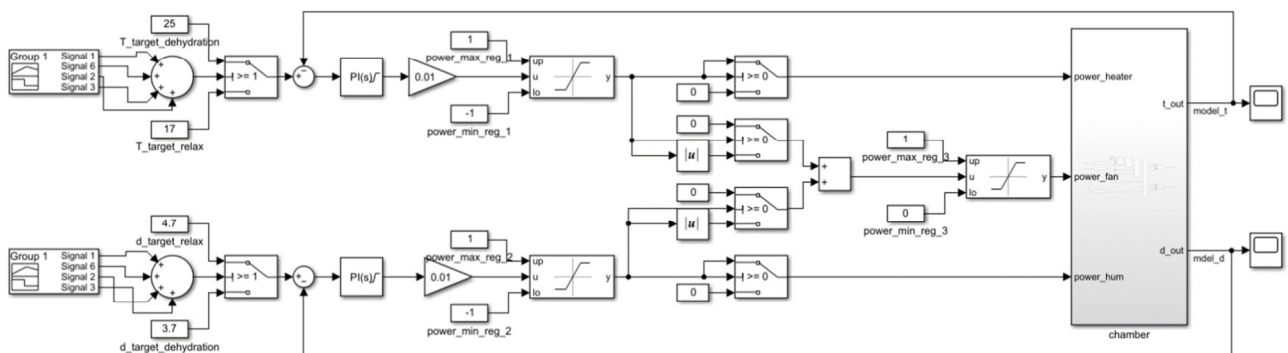


Рисунок 3.30 – Структурная схема при моделировании процесса холодной сушки гидробионтов по температуре и влагосодержанию

Структурная схема составлена на основе полученной модели секции сушки. Задание моделируемого процесса формировалось в соответствии с предлагаемой методикой задания комбинированных режимов обезвоживания с линейно изменяющимся временем релаксации рыбы. Температура на этапах обезвоживания в соответствии с режимом задана равной 25 °С, а относительная влажность – 20 %. На этапах релаксации заданное значение температуры составляет 17 °С, а относительной влажности – 40 %. Расчет влагосодержания по заданным значениям относительной влажности и температуры получить параметр  $d$  зад равным 3,8 г/кг при обезвоживании и 4,8 г/кг при релаксации сырья. Начальный коэффициент релаксации составлял 10 % от периода обезвоживания, конечный коэффициент равен 40 %. По полученным настройкам регулятора был проведен натурный эксперимент по аналогичному режиму и проведено сравнение переходных процессов. Переходные процессы регулирования температуры и влагосодержания процесса моделируемой системы (красным цветом) и реального процесса (голубым цветом) представлены на рисунках 3.31-3.32.

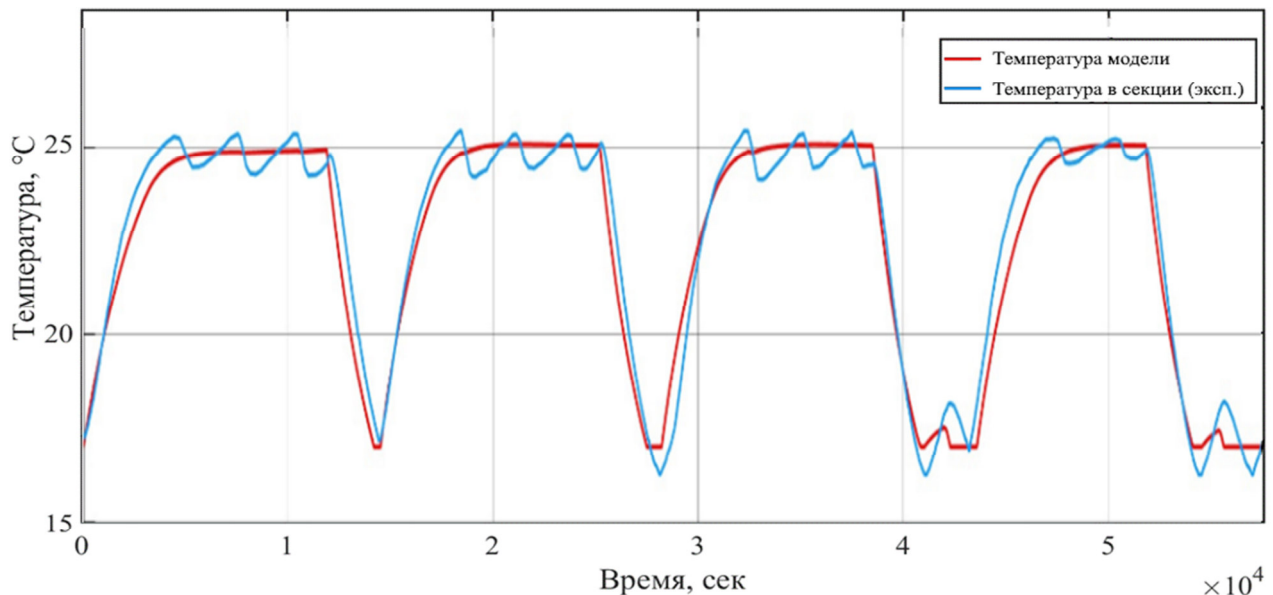


Рисунок 3.31 – Переходные процессы по температуре при моделировании процесса и эксперименте



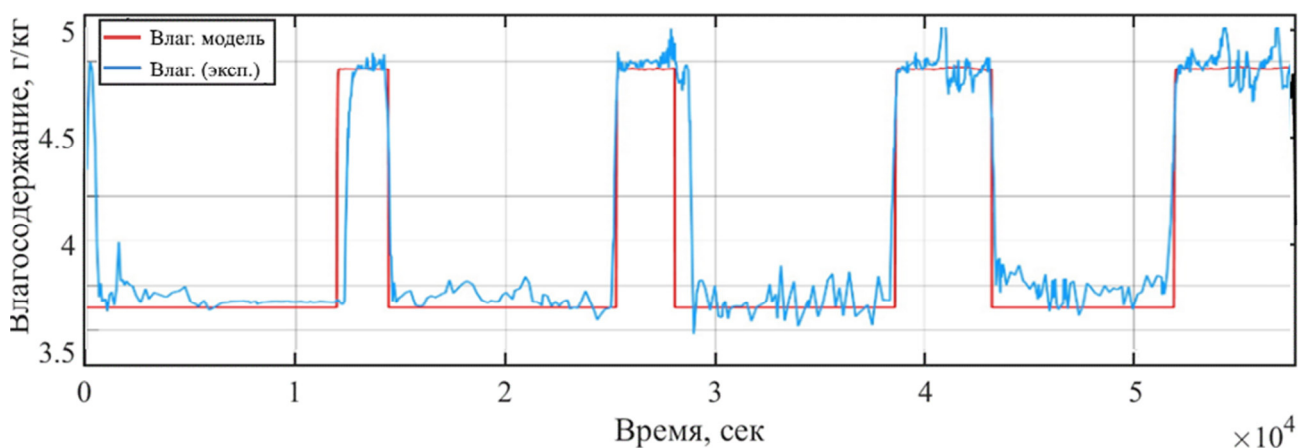


Рисунок 3.32 – Переходные процессы по влагосодержанию при моделировании процесса и эксперименте

Результаты сравнения графиков переходных процессов моделируемого процесса и эксперимента показывают высокую степень близости полученных данных. Максимальное отклонение значений моделирования от эксперимента не превышает 10% по температуре и 10% по влагосодержанию.

Также проводилась оценка эффективности работы регулятора при изменении параметров модели. В пределах 20% по интегральной оценке  $J$  рассчитываемой как интеграл суммы квадрата от рассогласования и квадрата от управления. Результаты оценки эффективности сведены в таблицы 3.1.

Таблица 3.1 – Результаты оценки эффективности регулятора контура температуры влагосодержания

Контур температуры		Контур влагосодержания	
№	$J_{\text{темп}}$	№	$J_{\text{влаж}}$
1	127,3	1	191,1
2	80,52	2	217,58
3	230,8	3	194,5
4	93,09	4	228,6
5	201,2	5	189,9
6	77,06	6	225,3

Анализ таблиц 3.1 показывает, что при изменении параметров модели в пределах 20%, также до 20% изменяется качество управления процессом с помощью ПИД-регулятора. Вариантами улучшения качества процесса в дальнейшем может быть применение МРС-регуляторов или ПИД-регуляторов с нечеткой коррекцией коэффициентов.

### 3.4 Исследование передачи данных в предлагаемом формате VTF по протоколу MQTT

Для тестирования передачи данных в формате VTF была собрана система передачи видеопотока (рисунок 3.33), состоящая из двух одноплатных компьютеров Raspberry Pi 4 Model B, миникомпьютера Beelink GT-King Pro, роутера Tenda AC23 и USB-видеокамеры. Beelink GT-King Pro в этой системе выступает в роли брокера, одноплатные компьютеры в роли издателя и подписчика соответственно. Устройства объединены по беспроводному интерфейсу Wi-Fi через роутер Tenda AC23 в одну сеть. На всех компьютерах установлена операционная система Manjaro ARM. В качестве реализации брокера используется Eclipse Mosquitto.

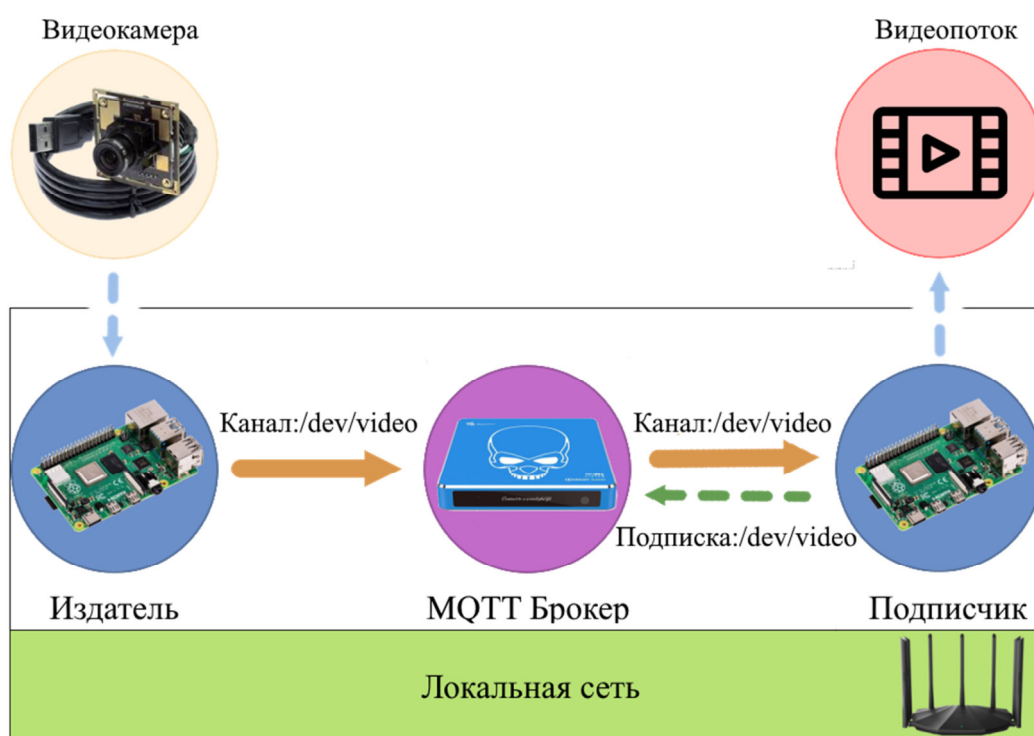


Рисунок 3.33 – Система передачи видеопотока в формате VTF

Издатель осуществляет захват кадра разрешением 320x240 пикселей с видеокamеры и преобразует его в JPEG изображение, изображение помещается в BSON-объект в виде массива двоичных данных (рисунок 3.34), после чего BSON-объект кодируется в формат VTF и отправляется в канал `/dev/video` с уровнем QoS 0. Подписчик слушает канал `/dev/video`, при получении данных, проверяет на соответствие формату VTF. Получив корректный VTF документ, производит операцию извлечения кадра и выводит его на экран.



Рисунок 3.34 – Видеокадр в виде BSON-объекта

Результаты исследования передачи видеопотока в формате VTF с сжатием и без сжатия представлены на рисунках 3.35 и 3.36.

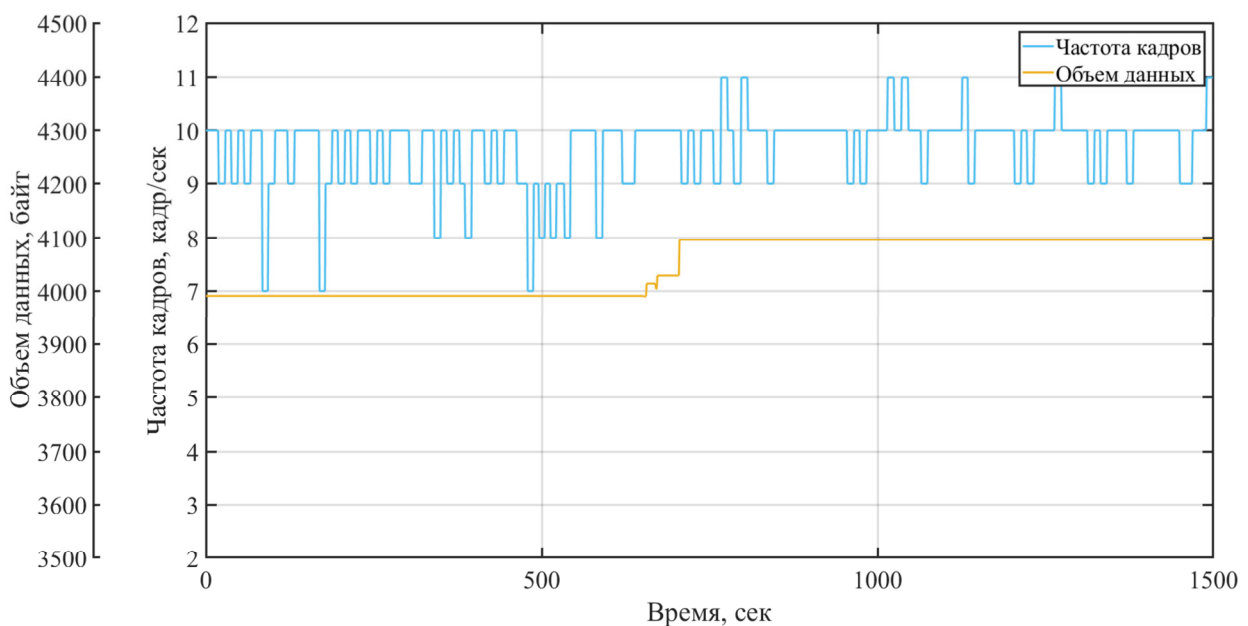


Рисунок 3.35 – Результаты эксперимента передачи видеопотока в формате VTF без сжатия

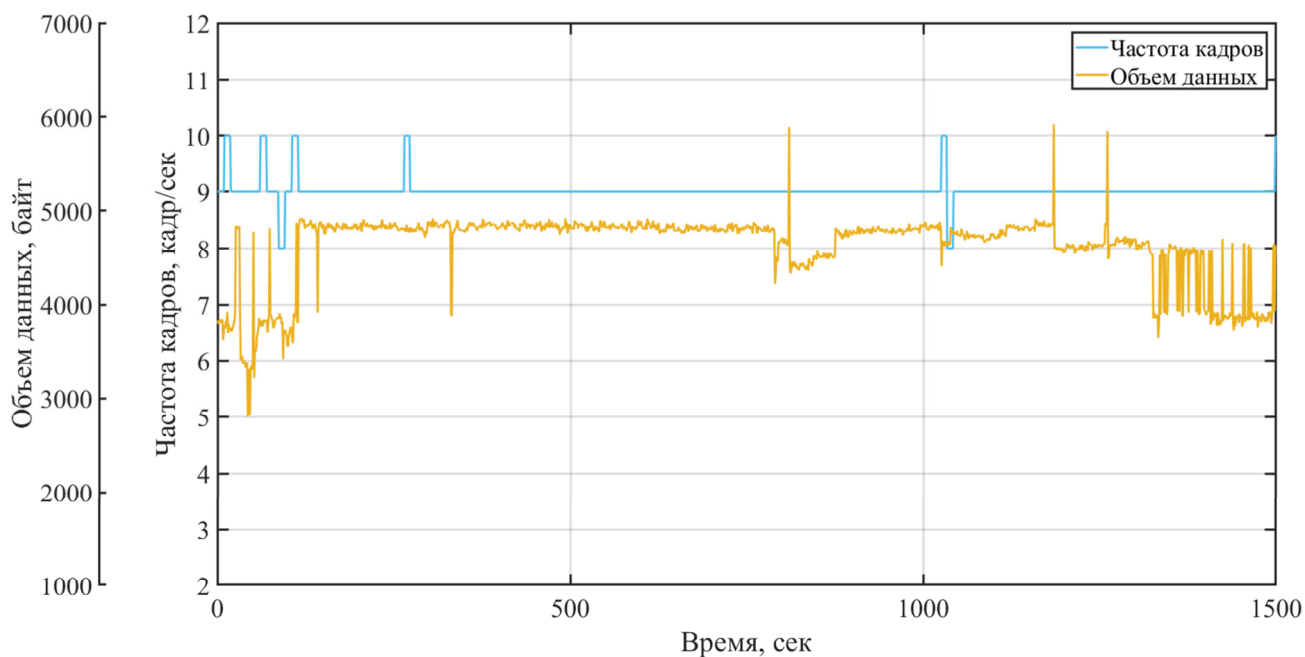


Рисунок 3.36 – Результаты эксперимента передачи видеопотока в формате VTF с сжатием

Средняя частота кадров при передаче видеопотока разрешением 320x240 в формате VTF без сжатия составила 9,662 кадров в секунду, при среднем объеме передаваемых данных 4048 байт. Средняя частота кадров с сжатием составила 9,0 кадров в секунду, при среднем объеме передаваемых данных 4620 байт. Снижение частоты кадров и сильные колебания объема связано с процессом сжатия и распаковки.

В рамках работы, была собрана аналогичная система передачи видеопотока в формате VTF, где в качестве издателя использовалась отладочная плата ESP32-CAM AI Thinker Wi-Fi (рисунок 3.37), предназначенная для проектирования высокопроизводительных и недорогих встраиваемых систем.

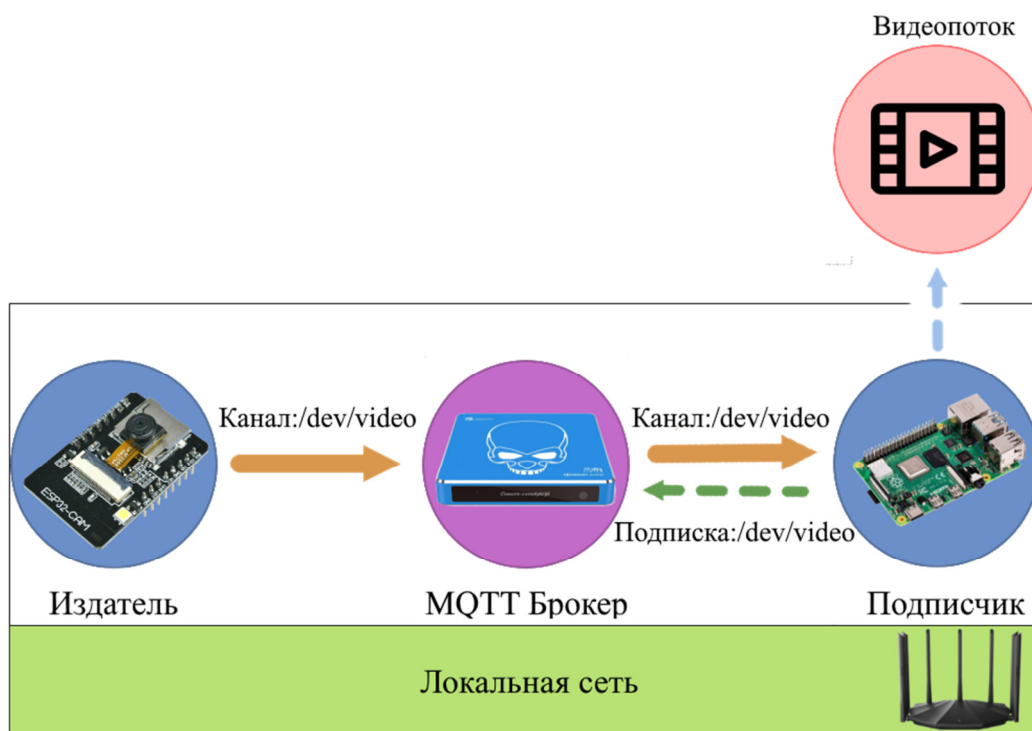


Рисунок 3.37 – Система передачи видеопотока в формате VTF с использованием отладочной платы ESP32-CAM AI Thinker Wi-Fi

Данная отладочная плата имеет двухъядерный микроконтроллер под управлением операционной системы FreeRTOS, встроенный Wi-Fi модуль и видеокамеру OV2640. Поддержка протокола MQTT была осуществлена с использованием библиотеки «PubSubClient», распространяемой под лицензией MIT для платформ на базе микроконтроллеров ESP8266 и ESP32 [82]. Библиотека предоставляет собой клиент для простой публикации и подписки. Позволяет публиковать только сообщения с уровнем QoS 0 и подписаться с уровнем QoS 0 или QoS 1. Максимальный размер сообщения, включая заголовок, по умолчанию составляет 256 байт, но может быть изменен. Клиент использует версию протокола MQTT 3.1.1.

Результаты исследования передачи видеопотока в формате VTF с сжатием и без сжатия по частям с ESP32-CAM AI Thinker Wi-Fi представлены на рисунках 3.38 и 3.39.

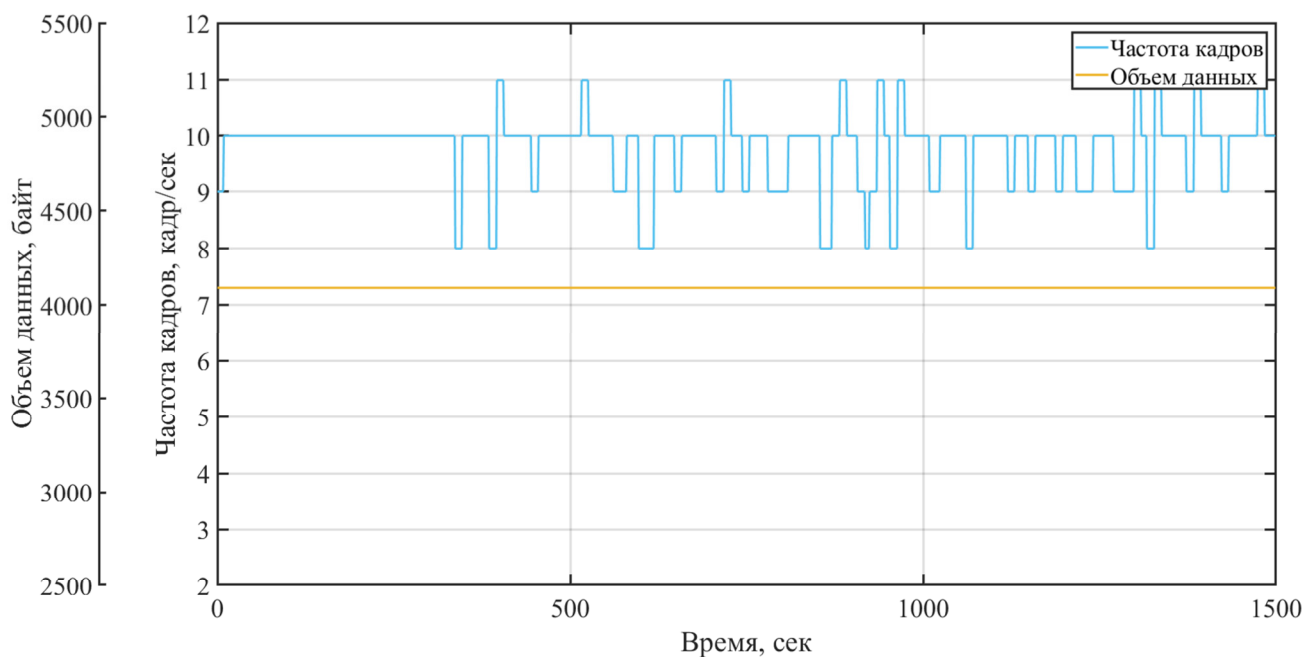


Рисунок 3.38 – Результаты эксперимента передачи видеопотока в формате VTF без сжатия по частям

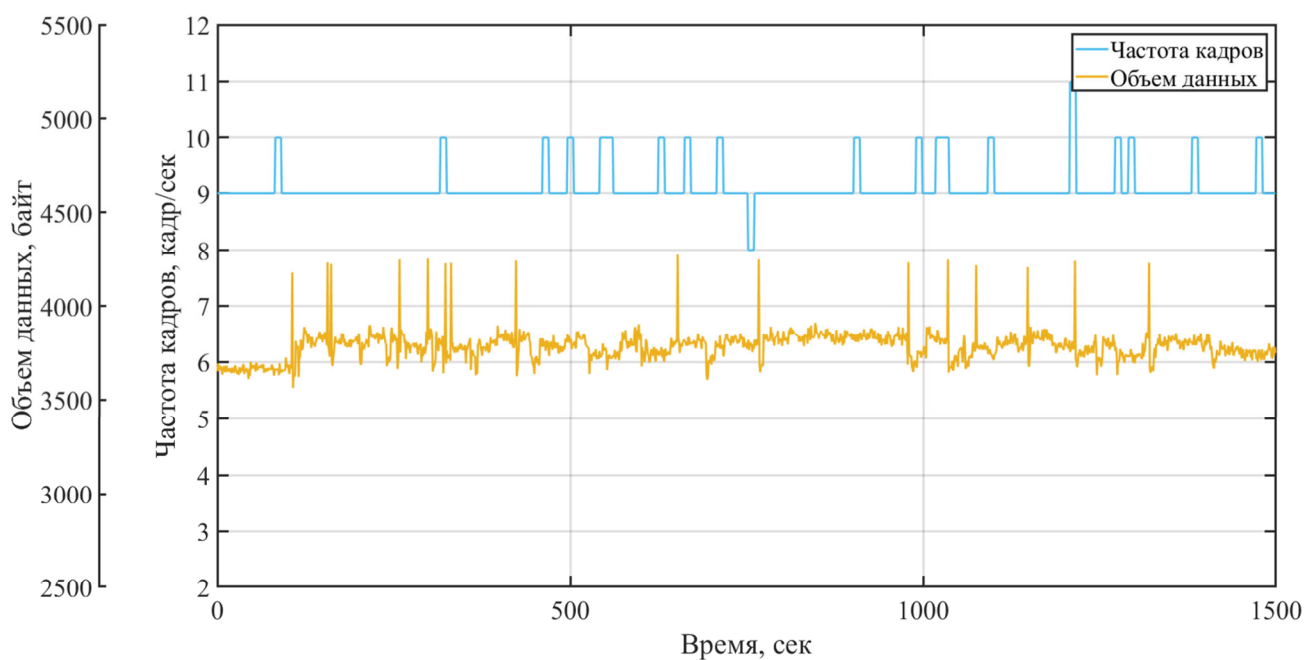


Рисунок 3.39 – Результаты эксперимента передачи видеопотока в формате VTF с сжатием по частям

Средняя частота кадров при передаче видеопотока разрешением 320x240 в формате VTF по частям с максимальной длиной пакета 1024 байта без сжатия составила 9,78 кадров в секунду, при среднем объеме передаваемых данных 4090

байт. Средняя частота кадров с сжатием составила 9,11 кадров в секунду, при среднем объеме передаваемых данных 3783 байта. Снижение частоты кадров и сильные колебания объема связано с процессом сжатия и распаковки, аналогично передаче одним блоком данных.

В результате можно сделать вывод, что передача данных в формате VTF по частям не снижает скоростные характеристики и позволяет использовать данный формат во встраиваемых системах.

### 3.5 Разработка алгоритма тепловизионного анализа поверхности гидробионтов

Температура поверхности продукта является важной кинетической характеристикой, поскольку для каждого продукта существует определенная максимальная температура нагрева. Превышение предела по температуре поверхности может привести к ухудшению свойств.

Из кинетики кривой сушки (рисунок 3.40) известно, что во втором периоде сушки повышение температуры поверхности ( $t$ ) продукта является зеркальным отражением уменьшения влагосодержания ( $w$ ).

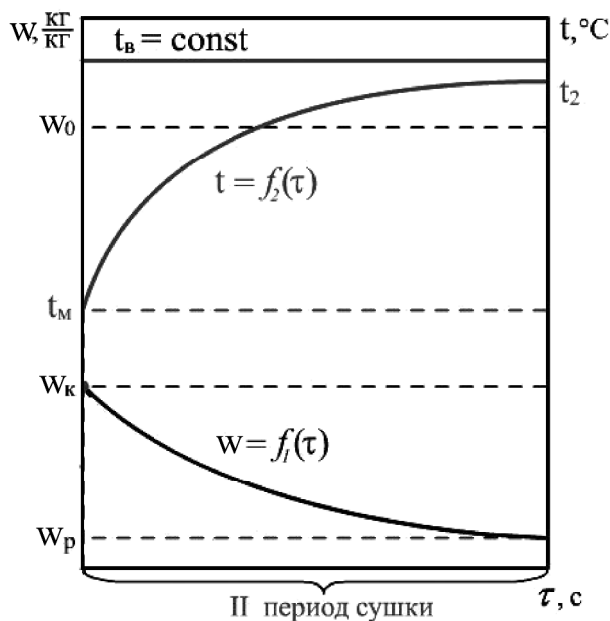


Рисунок 3.40 – Изменение температуры поверхности во втором периоде кривой кинетики

Для определения температуры поверхности продукта в пищевой промышленности применяются инфракрасные датчики температуры. Причем, измерение определенных диапазонов температур требует использования датчиков с определенным диапазоном инфракрасного спектра. Малая инерционность инфракрасных датчиков способствует быстрому, оперативному измерению температуры поверхности сырья без непосредственного контакта с объектом измерения. Точность измерения не зависит от расстояния до объекта, пока размер объекта больше диаметра области измерения. Измеренная температура будет не верна, если размер объекта меньше диаметра области измерения. Так как инфракрасный датчик температуры в данном случае будет принимать излучения от других объектов окружающей среды, которые оказывают влияние на точность измерения. Для правильного измерения температуры данный тип датчиков требует определения и установки излучательной способности измеряемого объекта. Основным недостатком таких измерительных приборов является определение температуры в определенной точке объекта измерения, что может быть недостаточно для определения динамики изменения температуры, так как температурное поле объекта может быть неоднородным.

Для определения изменения динамики температуры всего исследуемого объекта сегодня целесообразно использовать системы технического зрения [89]. Такая система состоит из тепловизионной матрицы, которая обладает всеми преимуществами инфракрасных датчиков, но позволяют снимать температурное поле некоторой области и RGB-камеры. Комплексные данные с такой системы позволяют обнаружить и сегментировать области, связанные с исследуемым объектом и его границы. Однако, основной проблемой такого рода систем, является объединение тепловизионного и видимого изображения [5].

Исследуемый объект на тепловых и видимых изображениях может выглядеть по-разному. Например, у исследуемого объекта может быть выраженная текстурированная поверхность, которая видна на цветных



изображениях, но не видна на тепловых изображениях. С другой стороны, на тепловых изображениях могут наблюдаться некоторые текстуры, вызванные неоднородностью температурного поля, которые не видны на цветном изображении. Из-за таких различий между тепловыми и видимыми изображениями найти соответствие очень сложно.

В данной работе были проведены исследование по получению совмещенного изображения. Для проведения экспериментов была построена система технического зрения (рисунок 3.41), описание которой было проведено ранее в пункте 2.4.10 данной работы. В разработанной системе технического зрения используется ИК-матрица MLX90640 производства Melexis, представляющую собой откалиброванную тепловизионную ИК-матрицу разрешением 32x24 пикселей.

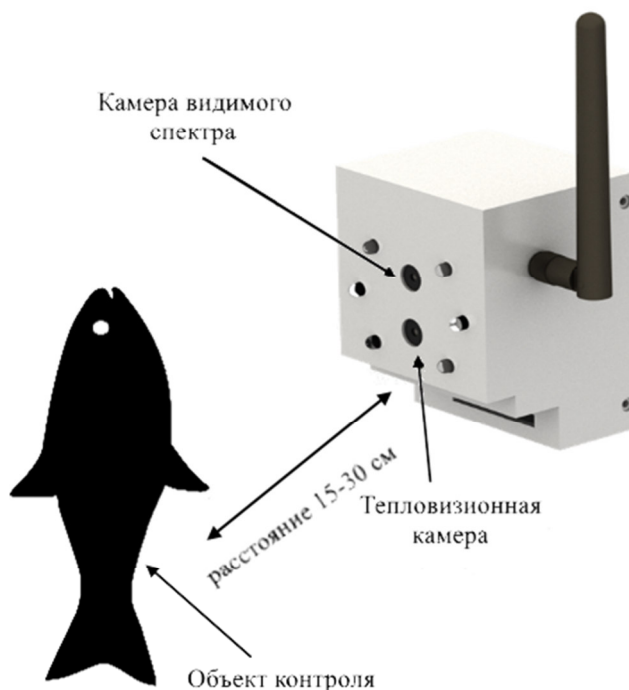


Рисунок 3.41 – Система технического зрения для контроля температуры поверхности

Для изменения размеров полученной матрицы температур до размера 320x240 точек используется билинейная интерполяция. Применение этого метода обусловлено относительно низкой вычислительной ресурсоёмкостью, что снижает время на масштабирование при удовлетворительном качестве. В дальнейшем полученная увеличенная матрица температур будет использоваться для определения температурного поля объекта, поскольку содержит измеренные значения температур точек поверхности. Пример результата работы алгоритма на матрице размерностью 3x3 приведен на рисунке 3.42.

```
12.42199375  5.03538281  11.42646775
 1.87960875  8.56345236  7.38160565
 1.68791539  9.95231097  8.14587824
```



```
12.42199375 10.57534102  6.88203555  6.63315405  9.82869652  11.42646775
 9.7863975  8.81914818  6.88464953  7.04186321  9.29078922  10.41525223
 4.515205   5.3067625  6.88987748  7.85928153  8.21497463  8.39282118
 1.83168541 3.60143081  7.14092162  8.57616871  7.9071721  7.5726738
 1.73583873 3.70315313  7.63778192  9.19252476  8.36738165  7.95481009
 1.68791539 3.75401429  7.88621208  9.50070279  8.59748642  8.14587824
```

Рисунок 3.42 – Пример работы алгоритма билинейная интерполяция

Для преобразования данной матрицы температур в изображение, необходимо задаться минимальным *min* и максимальным *max* значением температуры, их можно взять из самой матрицы или установить желаемые. После чего требуется каждый элемент матрицы пропорционально перенести из текущего диапазона значений (от *min* до *max*) в новый диапазон (от 0 до 255). Полученная матрица является, по сути, изображением в оттенках серого визуализирующее температурное поле.

К такому изображению применяют градиенты или тепловые палитры, определяющие внешний вид пикселей и помогающие идентифицировать различные источники тепла на получаемом изображении.

Пример такого изображения, полученный в камере сушки малогабаритной установки в оттенках серого и с применением тепловой палитры представлен на рисунке 3.43.

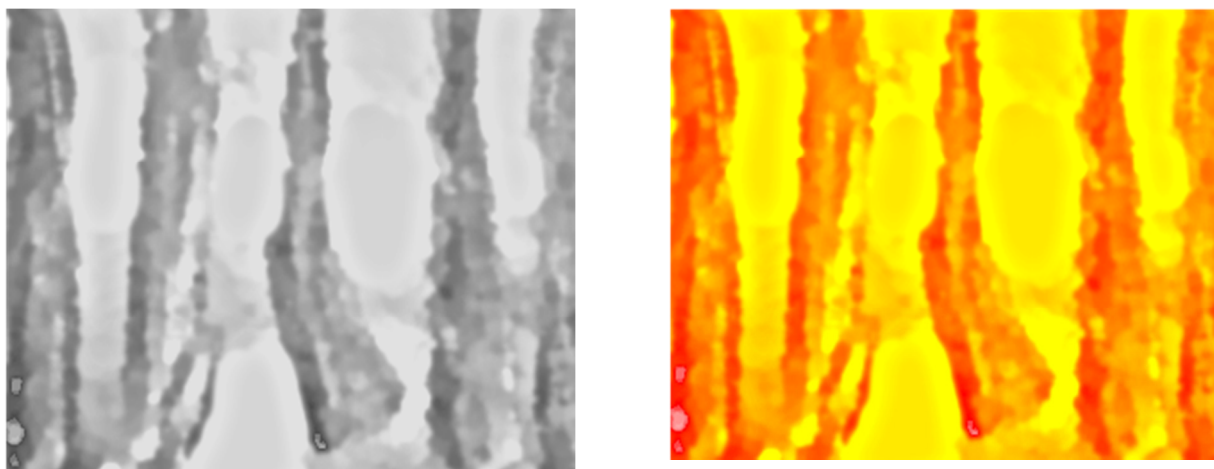


Рисунок 3.43 – Визуализация температурного поля внутри камеры сушки

Для измерения температуры поверхности продукта требуется определить его границы. Изображение с RGB-камеры позволяет точно определить границы исследуемого объекта, применив к нему соответствующие методы. Однако, предварительно требуется совместить изображения, как показано на рисунке 3.44.

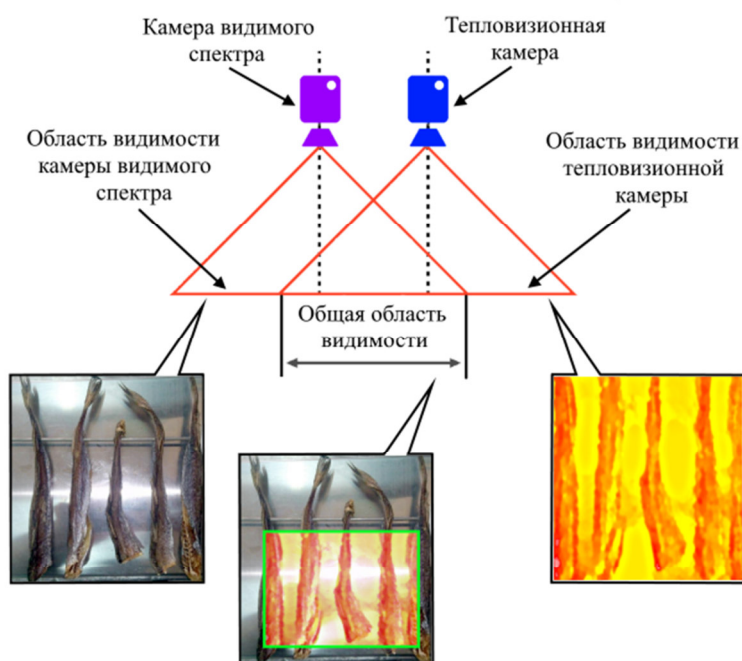


Рисунок 3.44 – Совмещение изображений видимого и инфракрасного спектра

Для совмещения изображений необходимо знать углы обзора обеих камер для правильного масштабирования изображений. Эти параметры можно найти в документации на оборудование. Однако, данный параметр может отличаться от действительного, тогда потребуется вычислить его экспериментальным путем.

Для определения данного параметра можно применить следующую методику. Необходимо по краям получаемого изображения расположить два объекта,, вне зависимости это камера видимого спектра или ИК-камера. Далее необходимо измерить расстояние между объектами и расстояние до камеры. Для расчета угла обзора воспользуемся следующей формулой:

$$fov = \frac{\pi}{180} \cdot \left( atan \left( \frac{w}{2d} \right) \cdot 2 \right), \quad (3.35)$$

где  $w$  – расстояние между объектами, м;

$d$  – расстояние до камеры, м.

Далее требуется провести калибровку камер [86, 87]. Процесс калибровки камеры заключается в определении ее внешних и внутренних параметров.

К внутренним параметрам камеры относятся дисторсия, описывающая искажение и матрица внутренних параметров. Матрица внутренних параметров имеет следующий вид:

$$A = \begin{bmatrix} \alpha_x & \gamma & u_0 \\ 0 & \alpha_y & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.36)$$

где  $u_0, v_0$  – координаты оптического центра;

$\gamma$  – наклон матрицы, можно считать равным нулю;

$\alpha_x, \alpha_y$  – фокусное расстояние камеры.

К внешним параметрам относятся матрица поворота  $R$ , описывающая ориентацию камеры, и вектор параллельного переноса  $T$ , определяющий положение центра камеры.

В рамках данной работы для калибровки камер был выбран метод Жанга. Данный метод использует калибровочный шаблон. В качестве такого шаблона был выбран набор кругов. Поскольку для камеры видимого света и ИК-камеры требуется использовать один шаблон, который должен быть виден на обоих изображениях, был изготовлен специальный шаблон. Шаблон с набором кругов был отфрезерован на листе фольгированного текстолита. Слой меди, соответствующий белой области шаблона, был удален, остался лишь слой, соответствующий черной области шаблона. Далее области были покрашены в соответствующие цвета. Таким образом при направлении на шаблон мощного источника света, черные сектора поглощают тепло и передают его медному слою, а белые области поглощают тепло плохо, отражая излучение. Такая разница температур хорошо видна на ИК-изображении, что позволяет использовать такой шаблон для калибровки двух камер.

Зная угол обзора камер и имея изображения с откалиброванных камер для совмещения остается найти смещение, вызванное расстоянием между камерами. Для этого необходимо сделать снимок шаблона камерами и обработать для получения вида, представленного на рисунке 3.45.

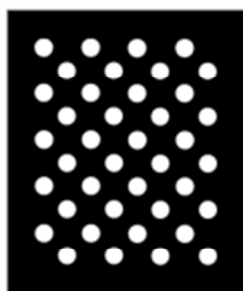


Рисунок 3.45 – Шаблон на изображении с постобработкой

Расположение шаблона на тепловизионном изображении определяется путем гомографии координат видимого изображения в координаты тепловизионного изображения (рисунок 3.46) [52]. Гомография между

изображениями определяется уравнением (3.38), а матрица гомографии  $H$  имеет следующий вид:

$$H = \begin{bmatrix} h_{11} & h_{12} & h_{13} \\ h_{21} & h_{22} & h_{23} \\ h_{31} & h_{32} & h_{33} \end{bmatrix} \quad (3.37)$$

$$\begin{aligned} x_{thermo} &= \frac{h_{11}x_{rgb} + h_{12}y_{rgb} + h_{13}}{h_{31}x_{rgb} + h_{32}y_{rgb} + h_{33}}, \\ y_{thermo} &= \frac{h_{21}x_{rgb} + h_{22}y_{rgb} + h_{23}}{h_{31}x_{rgb} + h_{32}y_{rgb} + h_{33}} \end{aligned} \quad (3.38)$$

Где  $x_{RGB}$ ,  $y_{RGB}$ ,  $x_{thermo}$  и  $y_{thermo}$  — координаты изображения с видеокамеры и теплового изображения.

$h_{ij}$  в уравнении (3.38) является элементом матрицы гомографии  $H$ .

Матрица гомографии получается путем сопоставления образов шаблона (рисунок 3.46), после чего вычисляется смещение.

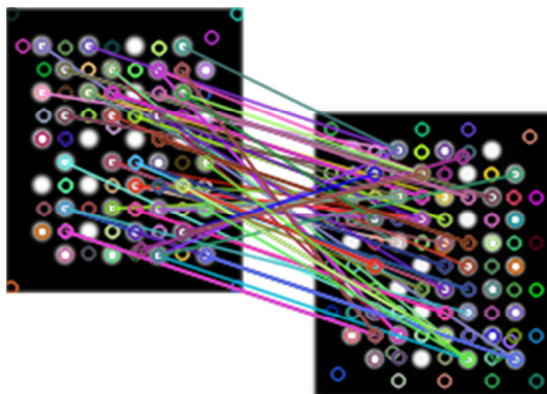


Рисунок 3.46 – Сопоставление образов шаблона

В рамках данной работы полученные параметры для совмещения изображений сохраняются в устройстве, как калибровочные константы. Эти данные передаются вместе с данными камер, для дальнейшей обработки на стороне клиента.

Имея совмещенное изображение, мы можем исследовать интересные нас участки [23, 48, 124]. Для получения усредненной температуры поверхности,

достаточно найти среднее значение температуры всех точек входящих в исследуемую зону.

В рамках данной работы были рассмотрены два варианта задания зон контроля, представленные на рисунке 3.47. В ручном режиме задания зон контроля (рисунок 3.47,а)), на термограмме располагается прямоугольник, и по координатам данного прямоугольника определяется средняя температура области, вписанной в него. Также был рассмотрен способ автоматического поиска контура (рисунок 3.47,б)). Для данного способа используется изображение видимого спектра. Поскольку стенки секции сушки имеют белый цвет, а продукт имеет темный цвет, достаточно применить методы поиска контура с заданными параметрами. По найденным контурам определяется средняя температура области, вписанной в них. Вариантами улучшения качества определения температуры поверхности продукта в дальнейшем может быть применение нейронных сетей, которые позволяют не только определять контуры продукта, но и при наличии группы объектов проводить их классификацию. Однако, это потребует повышения качества и размера изображений.

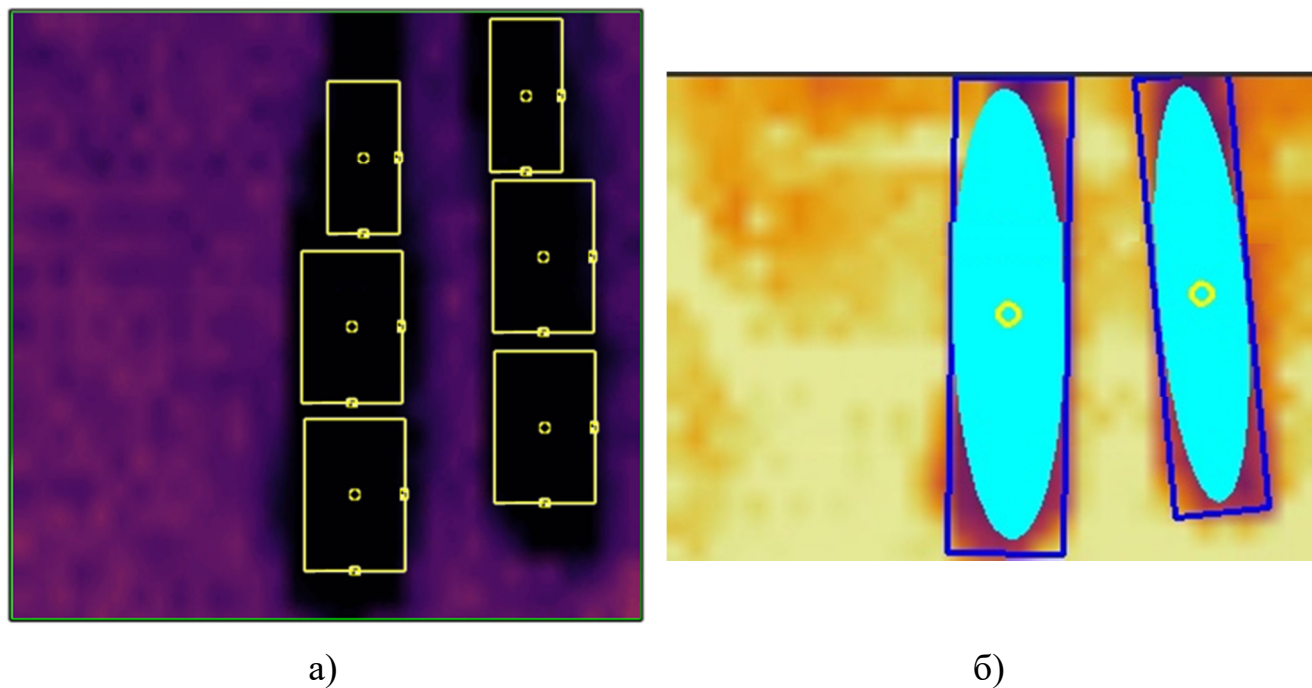


Рисунок 3.47 – Методы контроля температуры поверхности

### **3.6 Предпосылки создания цифрового двойника процесса обезвоживания гидробионтов**

В настоящее время моделирование различных процессов и систем происходит с применением цифровых двойников. Цифровой двойник позволяет смоделировать, что будет происходить с оригиналом при воздействии на него тех или иных факторов. Данный подход позволяет сэкономить при энергоемких процессах. Цифровым двойником является система, в которой всю необходимую информацию, которую можно получить от объекта, можно получить и от его двойника. На примере пищевых производств, такая система состоит из трех составляющих. Физического продукта, виртуального продукта в виртуальном пространстве и потока данных, который объединяет реальный и виртуальный продукт.

В рамках данной работы на этапе проектирования системы было разработано большое количество элементов программно-аппаратного комплекса. Проектирование элементов велось в САД системе T-Flex, данная система позволяет экспортировать разработанные модели в формате glTF, который представляющий собой стандарт для хранения трехмерных сцен и моделей. На этапе исследования были различные численные модели элементов системы. Предложенные программные решения на базе формата BTF и технологии интернета вещей позволяют объединить как трехмерные модели, так и численные в единое целое. В рамках данной работы это было реализовано на базе программной платформы 3D-визуализации в реальном времени Godot (рисунок 3.48) [22, 77, 103]. Данное решение представляет собой компьютерную модель, которая в дальнейшем может быть доработана до цифрового двойника, при наличии моделей продукта [78].



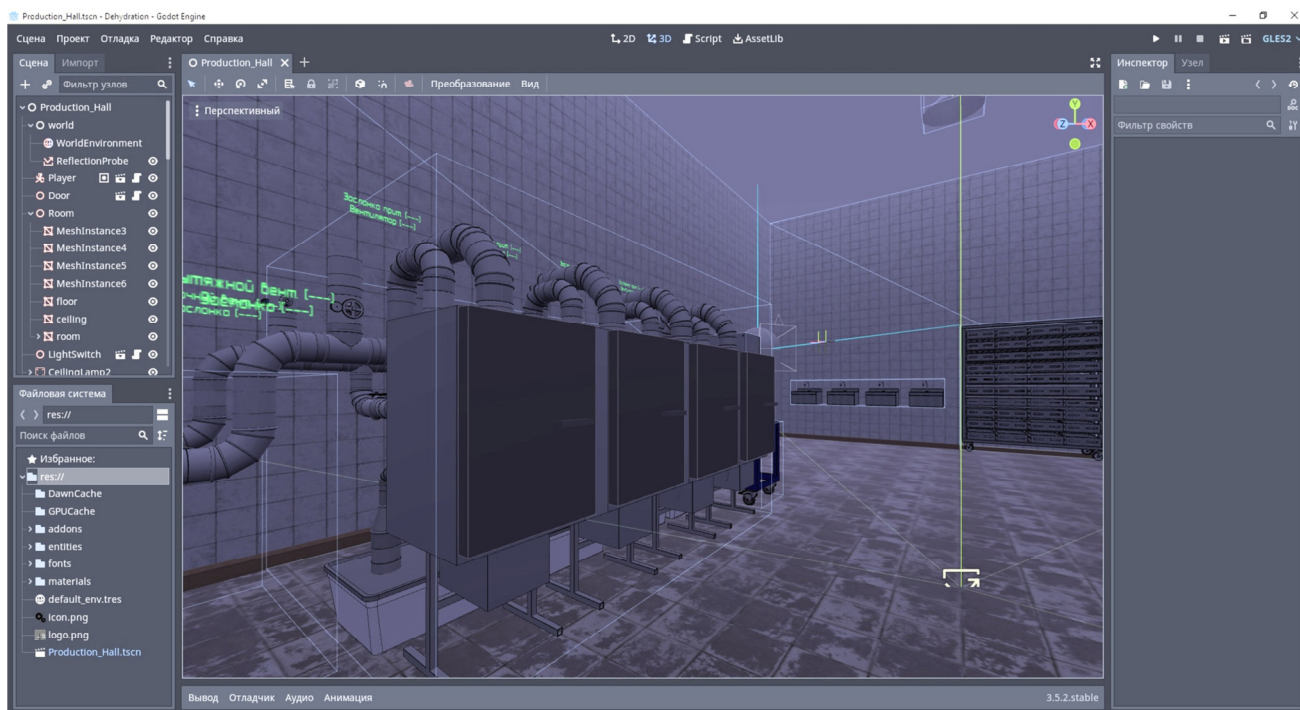


Рисунок 3.48 – Компьютерная модель на базе Godot

### 3.7 Исследования применимости N-участкового переменного способа

Эффективным методом сушки является превращение влаги в газообразное состояние на поверхности материала и в более глубоких слоях на протяжении всего процесса. Тепло от сушильного агента расходуется на испарение влаги с поверхности продукта при режиме сушки и от самого продукта в режиме релаксации. В режиме релаксации охлаждение сушильного агента вызывает повышение относительной влажности, но при этом за счет изменения парциальных давлений в продукте, влага из внутренних слоев интенсивно двигается к поверхности, одновременно с этим подсохший внешний слой продукта испытывает влияние низкой температуры сушильного агента снаружи, а тепла изнутри. Понижение скорости сушильного агента в режиме релаксации обеспечивает высокую скорость сушки.

При достижении продукта заданной температуры, температура поверхности продукта становится равна температуре в камере, перенос влаги из толщи к поверхности замедляется. Поверхность продукта становится влажной, так как высыхание, за счет внутреннего тепла прекращается.

В этот момент требуется перейти в режим сушки при заданной для продукта температуре. При повышении температуры сушильного агента, относительная влажность рабочей среды сначала падает, а затем начинает подниматься, сигнализируя о возросшем испарении с поверхности продукта. Продукт, холодный внутри, а влажный снаружи, интенсивно испаряет влагу, поддерживая невысокую температуру поверхности испарения. Как только температура продукта начинает подниматься к заданному пределу, это говорит о высыхании поверхностного слоя, а следовательно, требуется переключиться в режим релаксации.

Основываясь на этом предлагается N-участковый переменный способ. При осуществлении данного способа длительность всего процесса обезвоживания разбивается на N участков, со своими параметрами для режима сушки и «отлежки» (релаксации). Каждый участок разбивается на интервалы. Каждый отдельно взятый интервал состоит из периода сушки и периода релаксации. Отношение продолжительности релаксации рыбы к общей продолжительности периода линейно увеличивается в течение рассматриваемого участка времени. На этапе сушки температура повышается, а влагосодержание понижается. На этапе релаксации температура понижается, а влагосодержание повышается.

В рамках данной работы были проведены эксперименты с применением N-участкового переменного способа. Рассмотрим один из экспериментов. Температура в сушильной камере на этапах обезвоживания в соответствии с режимом задана равной 25 °С, а относительная влажность – 20 %. На этапах релаксации заданное значение температуры составляет 17 °С, а относительной влажности – 40 %. Расчет влагосодержания по заданным значениям относительной влажности и температуры позволил получить параметр  $d$  зад равным 3,8 г/кг при обезвоживании и 4,8 г/кг при релаксации сырья. Температура и влагосодержание в камере подготовки сушильного агента в течение всего процесса обезвоживания поддерживались постоянными ( $T_{под} =$

17 °С,  $d_{\text{под}} = 2,38 \text{ г/кг}$ ). Начальный коэффициент релаксации составлял 10 % от периода обезвоживания, конечный коэффициент равен 40 %.

В результате проведенного эксперимента по обезвоживанию рыбного сырья в течение 16 часов регулятор влагосодержания поддерживал заданные значения 3,7 и 4,8 г/кг (рисунок 3.49). Регулятор температуры сушильного агента осуществлял стабилизацию температуры с заданными значениями 25 °С на этапах обезвоживания (сушки) и 17 °С на этапах релаксации (рисунок 3.50). Сушильная установка обеспечила заданные параметры режимов релаксации сырья, увеличивая коэффициент с 10 % до 40 %.

На графике, представленном на рисунке 3.51, влагосодержание в начале и конце каждого этапа релаксации изменяется практически безинерционно, при этом относительная влажность изменяется плавно со скоростью изменения температуры среды. Таким образом, управление процессом обезвоживания рыбного сырья при регулировании температуры и влагосодержания сушильного агента обеспечивает выполнение заданного режима обезвоживания и не требует дополнительного развязывания контуров температуры и относительной влажности.

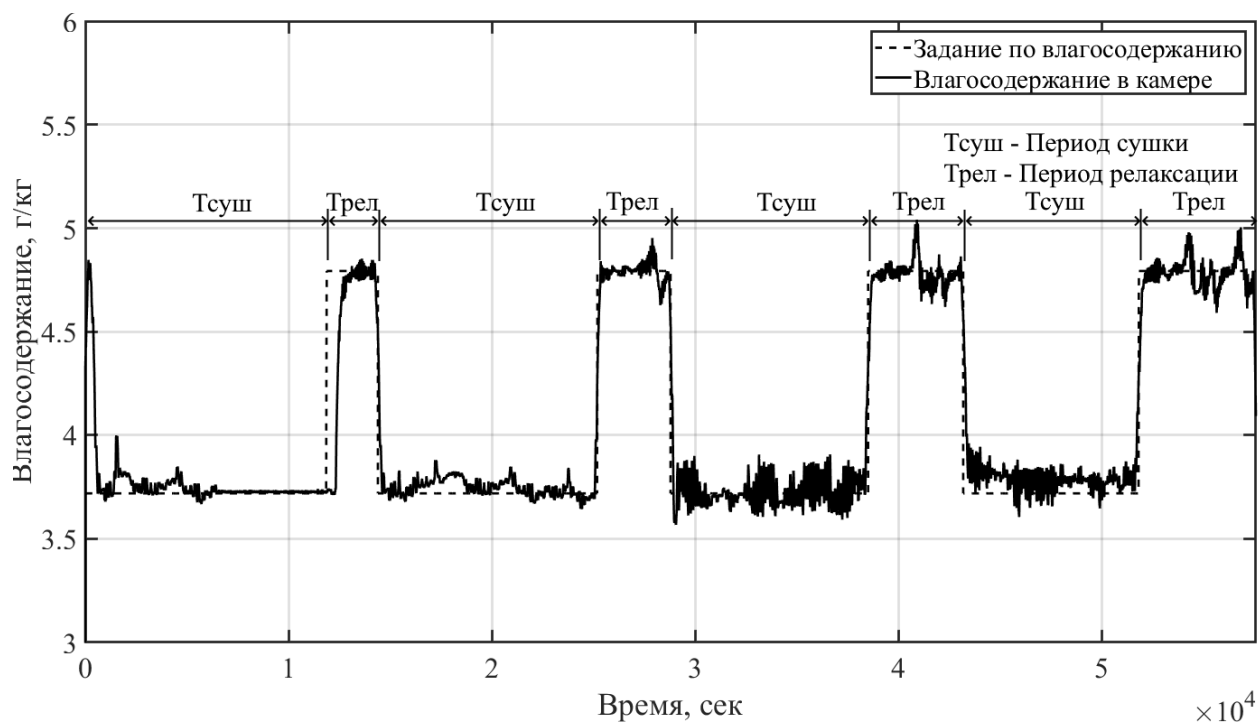


Рисунок 3.49 – График временной зависимости влагосодержания при проведении эксперимента

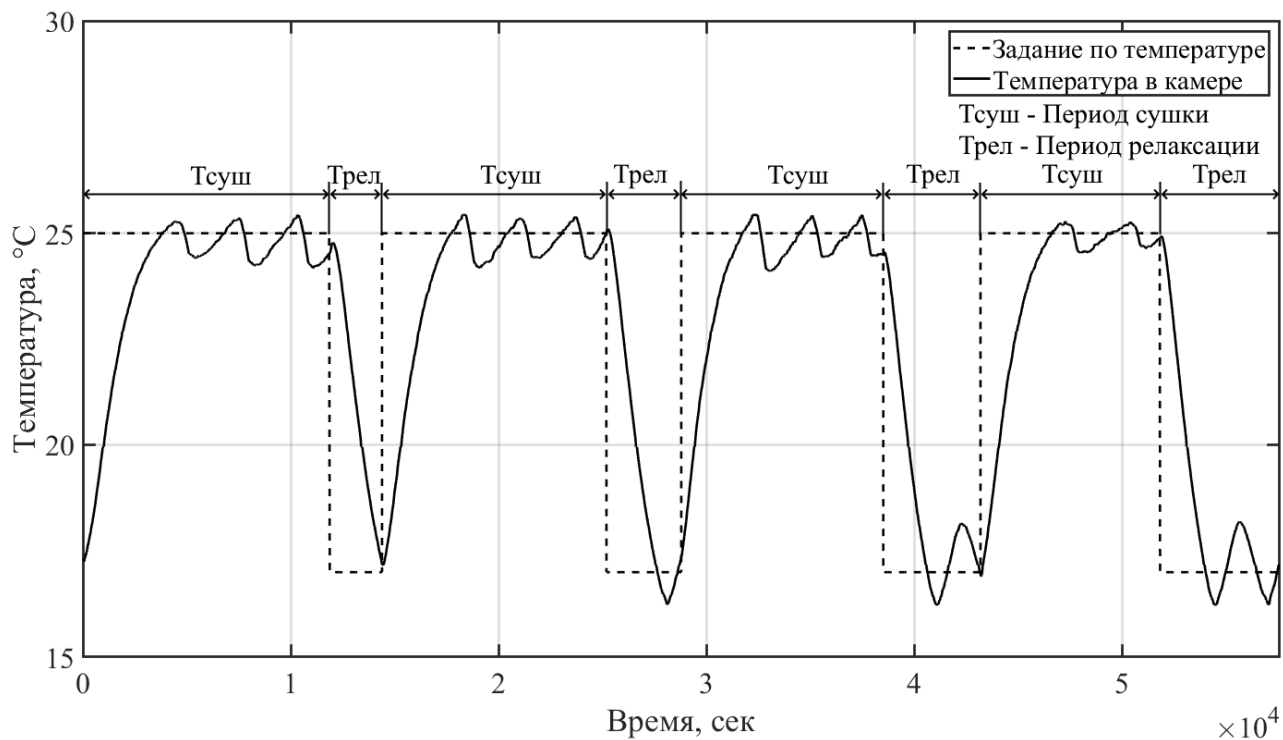


Рисунок 3.50 – График временных зависимостей температуры при проведении эксперимента

Контроль параметров сушильного агента (температуры, относительной влажности и влагосодержания) позволил представить технологический процесс обезвоживания рыбного сырья на *id*-диаграмме (рисунок 3.52). На диаграмме выделяются 4 характерные точки процесса А, В, С и D. Точка А соответствует заданию режима на этапе релаксации (17 °С – температура и 40 % – относительная влажность). Точка С соответствует заданию режима на этапах обезвоживания (25 °С – температура и 20 % – относительная влажность). При переходе от этапа релаксации к этапу обезвоживания на диаграмме выделяется точка В, в которой значительно уменьшается влагосодержание (АВ) и осуществляется нагрев сушильного агента (ВС) в камере. При переходе от этапа обезвоживания к этапу релаксации выделяется точка D. В начале этапа происходит значительное увеличение влагосодержания (CD) с последующим охлаждением среды в камере обезвоживания (DA). Оценка потребляемой энергии на процесс показала повышение энергоэффективности при

использовании предлагаемого способа обезвоживания до 10%.

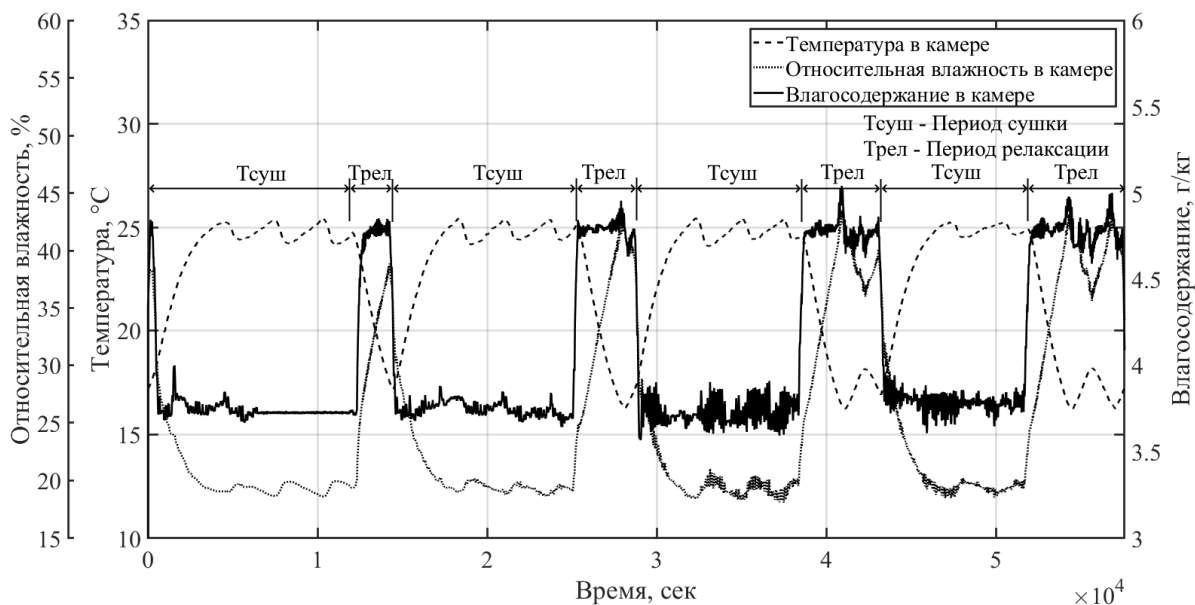


Рисунок 3.51 – График временных зависимостей относительной влажности, температуры и влагосодержания при проведении эксперимента

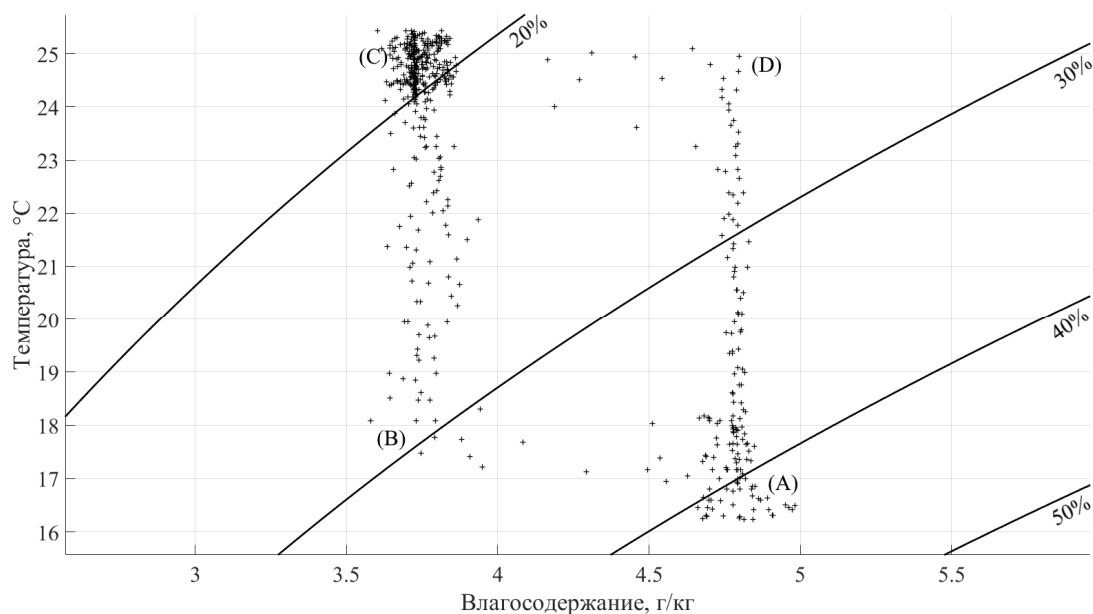


Рисунок 3.52 – id-диаграмма при проведении эксперимента

Основными параметром, характеризующим процесс обезвоживания, является скорость удаления влаги из рыбного сырья. Этот параметр косвенно можно оценить через потерю массы. Для оценки эффективности исследуемого

режима используется комплексная оценка, состоящая из двух параметров: скорости обезвоживания (она должна быть не медленнее непрерывного процесса) и затрат энергии на процесс.

В рамках проведенных экспериментов производилась оценка температуры поверхности рыбного сырья. В процессе обработки результатов экспериментов была подтверждена теория о зависимости температуры поверхности рыбы от скорости удаления влаги и потери массы. На рисунке 3.53 представлен график изменения температуры поверхности рыбы в процессе сушки. На этапах обезвоживания циркуляционный вентилятор, обеспечивающий скорость потока 2 м/с, включен, и температура сушильного агента в камере составляет 25 °С. На этапах релаксации циркуляционный вентилятор выключен, и температура в камере составляет 17 °С. Для этапа непосредственного обезвоживания подобран полином методом наименьших квадратов, описывающий зависимость температуры поверхности сырья от времени процесса для данного эксперимента:

$$T_{\text{тек}} = -0,0000000027 \cdot t^2 + 0,0002617201 \cdot t + 17,4417040341 \quad (3.39)$$

где  $t$  – время процесса обезвоживания (сек.);

$T_{\text{тек}}$  – текущая температура поверхности сырья (°С).

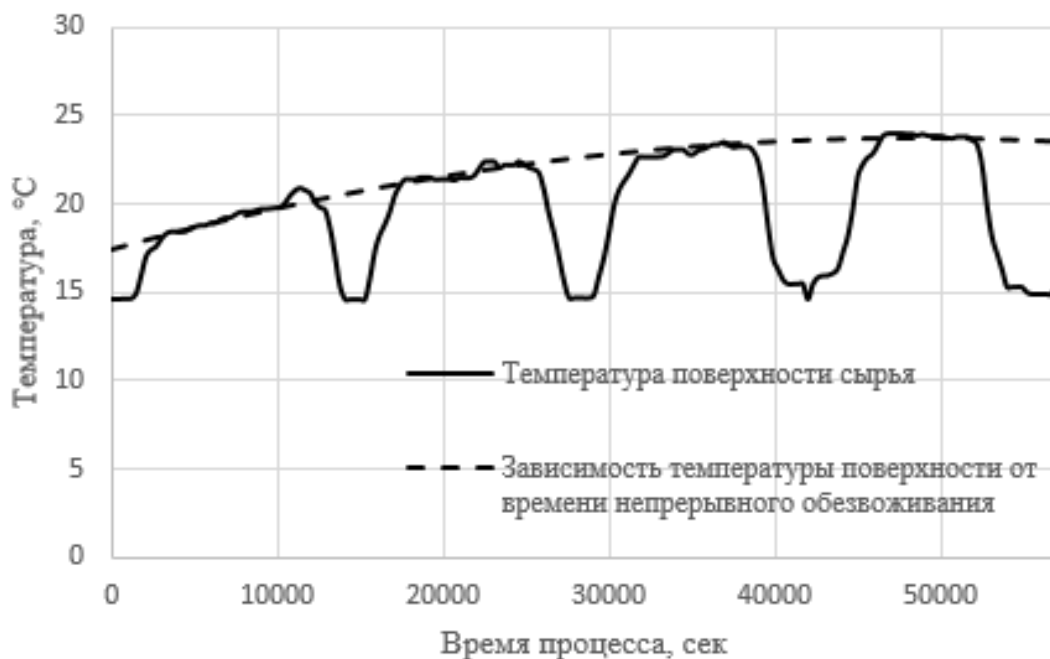


Рисунок 3.53 – Температура поверхности рыбного сырья

Формула (3.39) адаптирована для описания графика потери массы рыбного сыря (рисунок 3.54) и выглядит следующим образом:

$$M_{\text{тек}} = (k \cdot (T_{\text{кон}} - T_{\text{тек}}) + M_{\text{кон}}) \cdot 1,06, \quad (3.40)$$

где  $k$  – коэффициент пропорциональности ( $\frac{\text{г}}{\text{°C}}$ );

$M_{\text{тек}}$  – масса сыря текущая (г);

$M_{\text{нач}}$  – масса сыря начальная (г);

$M_{\text{кон}}$  – масса сыря конечная (г);

$T_{\text{тек}}$  – температура поверхности сыря текущая (°C);

$T_{\text{кон}}$  – температура поверхности сыря конечная (°C);

$T_{\text{нач}}$  – температура поверхности сыря начальная (°C).

$$k = \frac{M_{\text{нач}} - M_{\text{кон}}}{T_{\text{кон}} - T_{\text{нач}}}. \quad (3.41)$$

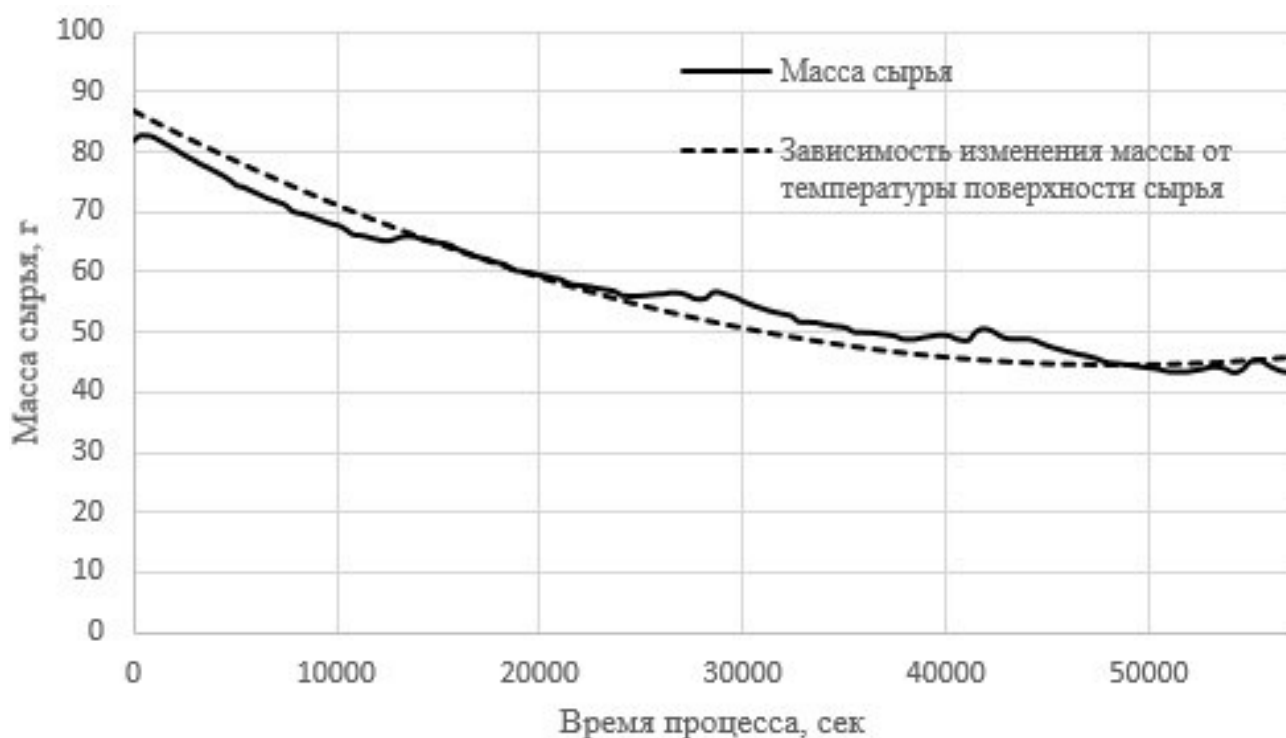


Рисунок 3.54 – График изменения массы рыбного сыря в процессе обезвоживания

Отклонение значений, полученных по расчетной формуле от экспериментальных данных изменения массы, не превышает 5%. На основании

вышеизложенного можно сделать вывод о том, что измерение температуры поверхности рыбного сырья в процессе непрерывного обезвоживания позволяет оценить скорость удаления влаги и потерю массы сырья. Контроль этих параметров позволит адаптировать многоконтурные системы автоматического управления на ускорение процесса обезвоживания за счет обеспечения максимальной скорости удаления влаги из рыбного сырья. Добавление модуля аналитики и разработки адаптивных режимов обеспечит реализацию рационального управления при снижении энергопотребления сушильной установки и сокращении времени технологического процесса. Структурная схема предполагаемой такой системы представлена на рисунке 3.55.

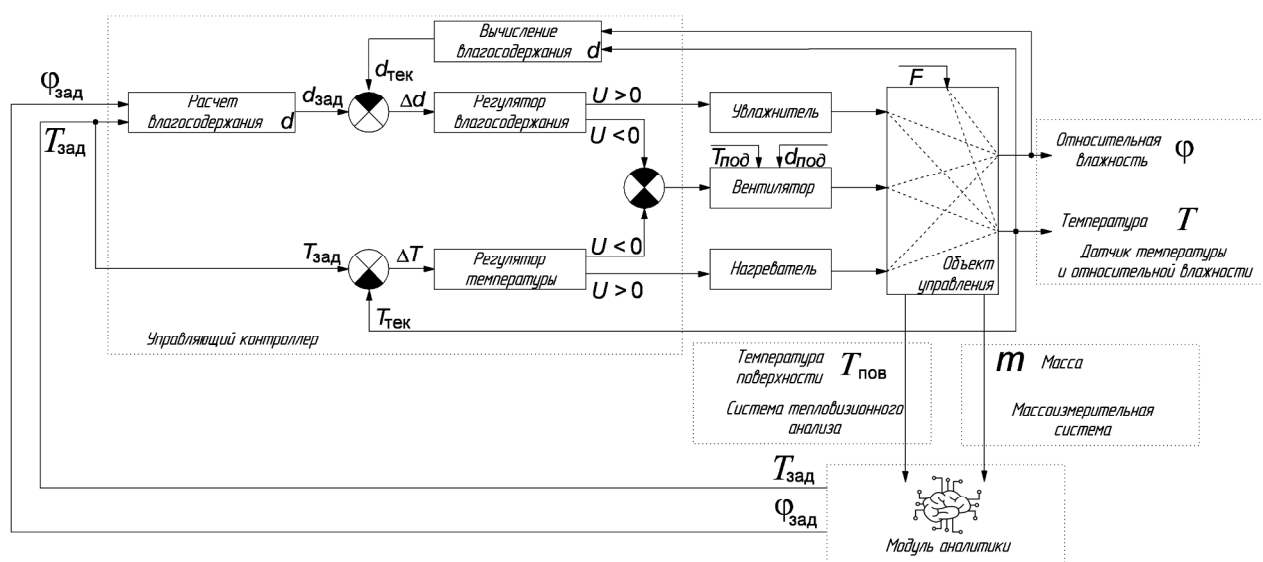


Рисунок 3.55 – Структурная схема системы с применением адаптивных режимов и модуля аналитики

### Выводы по 3 главе

Предложены математические модели, которые позволяют провести синтез регуляторов для установки УПОР-М и получить оптимальные по качеству управления настройки системы, а также разработать алгоритмы управления программно-аппаратного комплекса.

В результате проведенных экспериментов и обработки полученных данных, установлено, что управление процессом обезвоживания рыбного сырья



при регулировании температуры и влагосодержания сушильного агента обеспечивает выполнение заданного режима сушки и не требует дополнительного развязывания контуров температуры и относительной влажности.

Предложены два варианта систем автоматического регулирования позволяющие добиться процесса обезвоживания рыбы с определённой энергоэффективностью технологического процесса и улучшением качества продукта. Первый, в котором объектом управления является температурно-влажностное поле. Второй, в котором объектом управления является температура поверхности продукта.

Предложены методы получения совмещенного изображения и определения температуры поверхности продукта.

Рассмотрены методы передачи данных в предлагаемом формате ВТФ.

Созданы предпосылки для создания цифрового двойника процесса холодной сушки гидробионтов.

Предложенные каналы контроля по массе сырья, температуре поверхности рыбы посредством тепловизионного контроля в совокупности с видео-мониторингом состояния рыбы позволят в дальнейшем повысить динамическую точность, оптимизировать энергетические и временные затраты на управление за счет разработки адаптивных режимов.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В рамках данной работы был проведен анализ литературы, который показал, что в настоящий момент исследуются вопросы повышения энергоэффективности технологического процесса обезвоживания, разрабатываются новые способы обезвоживания и новое оборудование. Исследования в данной области показывают широкую географию учёных и исследователей. Рассмотрены современные типовые системы управления сушильными установками и цифровые промышленные технологии, применяемые при автоматизации и цифровизации систем управления пищевыми технологическими процессами.

Представлена программно-целевая модель исследований. Рассмотрена существующая система управления сушильной установкой. Рассмотрены недостатки существующей системы. Разработаны элементы необходимые для модернизации малогабаритной сушильной установки исследования процессов обезвоживания.

Разработан и предложен способ автоматического управления процессом холодной сушки гидробионтов. В результате проведенных экспериментов и обработки полученных данных, установлено, что управление процессом обезвоживания рыбного сырья при регулировании температуры и влагосодержания сушильного агента обеспечивает выполнение заданного режима сушки и не требует дополнительного развязывания контуров температуры и относительной влажности. Предложены два варианта систем автоматического регулирования позволяющие добиться процесса обезвоживания рыбы с определённой энергоэффективностью технологического процесса. Первый, в котором объектом управления является температурно-влажностное поле. Второй, в котором объектом управления является температура поверхности продукта.

Проведено цифровое моделирование тепловых и влажностных процессов при обезвоживании рыбного сырья. Предложены математические модели,

которые позволяют провести синтез регуляторов и получить оптимальные по качеству управления настройки системы, а также разработать алгоритмы управления программно-аппаратного комплекса.

Разработан интеллектуальный датчик для процесса холодной сушки. В его основе массоизмерительная система, которая позволяет фиксировать начальную массу продукта и отслеживать динамику изменения массы в течение технологического процесса и устройство непрерывного контроля температуры поверхности сырья с использованием тепловизионного анализа и технического зрения. Предложены методы получения совмещенного изображения и определения температуры поверхности продукта. Каналы контроля по массе сырья, температуре поверхности рыбы посредством тепловизионного контроля в совокупности с видеомониторингом состояния рыбы позволят в дальнейшем повысить динамическую точность, оптимизировать энергетические и временные затраты на управление за счет разработки адаптивных режимов.

Проведена модернизация системы автоматического управления малогабаритной сушильной установки. Предложен формат передачи динамических структур данных, обеспечивающий сжатие больших объёмов данных и минимизирующий время на интерпретацию данных в процессе десериализации. Предложена реализация информационного шлюза, позволяющего создать систему управления на базе предлагаемой структуры каналов и формата VTF. Предложена программно-аппаратная реализация уровня управления процессом и человеко-машинный интерфейс на базе графической библиотеки ImGui и web-технологий. Созданы предпосылки для создания цифрового двойника сушильной установки холодной сушки гидробионтов.

## Список литературы

1. Аверкин А.Г., Еремкин А.И., Ежов Е.Г., Аверкин Ю.А. Столетие i-d-диаграммы влажного воздуха: устройство, применение, модернизация // Региональная архитектура и строительство. 2017. № 4(33). С. 166–172.
2. Анализ многосвязного технологического процесса как объекта управления на примере пищевых производств / В. Г. Матвейкин, Б. С. Дмитриевский, А. А. Терехова [и др.] // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2022. – Т. 28, № 4. – С. 534 – 543. doi: 10.17277/vestnik.2022.04.pp.534-543
3. Аношин, И. М. Теоретические основы массообменных процессов пищевых производств : для технол. специальностей вузов пищевой пром-сти / И. М. Аношин. – Москва : Пищевая пром-сть, 1970. – 342 с.
4. Арзамасцев, А.А. Автоматизированная технология построения экспертных информационных систем / А.А. Арзамасцев, А.В. Неудахин // Вестник Тамбовского 186 университета. Серия: Естественные и технические науки. – Тамбов. – 2008. – Т.13. – Вып. 1. – С. 83–85
5. Балашов, А. Д. Разработка системы срачивания изображений с использованием OpenCV / А. Д. Балашов // Вопросы устойчивого развития общества. – 2021. – № 6. – С. 598-604. – EDN UNPJAF.
6. Балыхин М.Г. Методологические основы создания экспертных систем контроля и прогнозирования качества пищевой продукции с использованием интеллектуальных технологий: Монография/ М.Г. Балыхин, А.Б. Борзов, И.Г. Благовещенский. – М.: Франтера, 2017. – 395 с.
7. Белов, В. А. Оценка временной эффективности форматов хранения больших данных в динамике роста объема данных / В. А. Белов, Е. В. Никульчев // Современные информационные технологии и ИТ-образование. – 2021. – Т. 17, № 4. – С. 889-895. – DOI 10.25559/SITITO.17.202104.889-895. – EDN AQMHUX.
8. Бунин, Д. Х. Внешний тепломассобмен между рыбой и коптильной средой в процессе холодного копчения рыбы / Д. Х. Бунин, М. В. Попов // Механизация и автоматизация добычи и обработки рыбы и нерыбных объектов :

сб. науч. тр. / ВНИИ мор. рыб. хоз-ва и океанографии ; [редкол.: Д. Е. Бунин (гл. ред). и др.]. – Москва, 1985. – С. 75-87.

9. Власенко О.М., Тимохин А.Н., Захаркина С.В., Масанов Д.В. Моделирование многосвязной системы управления кондиционированием воздуха в цехе производства полимерных материалов // Дизайн и технологии. 2020. № 77(119). С. 68–77.

10. Власов, А. Б. Разработка автономного извещателя контроля состояния высоковольтных систем судов на основе тепловизионной диагностики / А. Б. Власов, В. В. Ерещенко // Наука - производству : Материалы международной научно-практической конференции, Мурманск, 18–20 апреля 2018 года. – Мурманск: Мурманский государственный технический университет, 2018. – С. 9-11. – EDN YMBCBF.

11. Власов, А. Б. Разработка устройства непрерывного ИК-контроля электрического оборудования на судах / А. Б. Власов, В. В. Ерещенко, В. В. Ерещенко // Наука и образование - 2018 : Материалы всероссийской научно-практической конференции, Мурманск, 15 ноября 2018 года. – Мурманск: Мурманский государственный технический университет, 2019. – С. 292-298. – EDN VHQNEG.

12. Воскресенский, Н. А. Технология рыбных продуктов / Н. А. Воскресенский, Л. П. Логунов. – М. : Пищ. пром-сть, 1968. – 422 с.

13. Вотинков, М. В. Моделирование и оптимизация цифровых пропорционально-интегрально-дифференциальных регуляторов на базе программного обеспечения pid optimize viewer / М. В. Вотинков, А. А. Маслов // Вестник НГУ. Сер. Информационные технологии. – Новосибирск, 2011. – Т. 9, №. 2. – С. 5-14.

14. Выскубов Е. В. Разработка микропроцессорных систем управления периодическими процессами тепловой обработки пищевых продуктов (на примере САУ стерилизации консервов): дис. ... канд. техн. наук: 05.13.07 / Выскубов Евгений Владимирович. – Краснодар, 1996. – 162 с.

15. ГОСТ 24.701-86. Единая система стандартов автоматизированных систем управления. Надёжность автоматизированных систем управления. Основные положения. – Взамен ГОСТ 24.701–83 ; введ. 1987–06–30. – М. : Стандартиформ, 2009. – 12 с.

16. ГОСТ 28115-89. Аппараты и установки сушильные. Классификация. – Введ. 1990–01–01. – М. : Изд-во стандартов, 1989. – 25 с.

17. ГОСТ 34.003–90. Информационная технология. Комплекс стандартов на автоматизированные системы. Автоматизированные системы. Термины и определения. – Взамен ГОСТ 24.003–84, ГОСТ 22487–77 ; введ. 2009–09–01. – М.: Стандартиформ, 2009. – 16 с.

18. Грибков, А. Н. Функциональное и информационное моделирование информационно-управляющей системы сушильными установками / А. Н. Грибков // Инженерная физика. – 2009. – № 6. – С. 36-39. – EDN KPZCTN.

19. Гридин, В. Н. Методы повышения быстродействия веб-приложений на основе протокола WebSocket / В. Н. Гридин, В. И. Анисимов, С. А. Васильев // Вестник компьютерных и информационных технологий. – 2016. – № 3(141). – С. 38-43. – DOI 10.14489/vkit.2016.03.pp.038-043. – EDN VSCWEN.

20. Грицкевич, Д. С. Сравнение технологий реализации распределенного взаимодействия между элементами системы / Д. С. Грицкевич // МАТЕРИАЛЫ и МЕТОДЫ ИННОВАЦИОННЫХ исследований и РАЗРАБОТОК : сборник статей международной научно-практической конференции: в 3 частях, Челябинск, 03 декабря 2016 года. Том Часть 2. – Челябинск: Общество с ограниченной ответственностью "ОМЕГА САЙНС", 2016. – С. 20-22. – EDN XBQQKN.

21. Гроховский, В. А. Научное обоснование и разработка инновационных технологий производства продуктов из гидробионтов Арктического региона : специальность 05.18.04 "Технология мясных, молочных и рыбных продуктов и холодильных производств" : автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук / Гроховский Владимир Александрович. – Мурманск, 2012. – 40 с. – EDN QIJKYR.

22. Грузин, Н. А. Сравнение движков для разработки игр: Godot Engine и Unity / Н. А. Грузин // Modern Science. – 2021. – № 1-1. – С. 440-444. – EDN TNHEWP.

23. Денисов, Д. А. Распознавание плоских объектов / Д. А. Денисов, А. А. Гоева // Вестник МГУП имени Ивана Федорова. – 2015. – № 6. – С. 72-73. – EDN VNUFQJ.

24. Ерещенко, В. В. Модернизация малогабаритной установки для поиска оптимальных технологических режимов сушки сырья. Разработка плат управления исполнительными механизмами и сбора данных с интерфейсом RS-232 и поддержкой протокола MODBUS RTU / В. В. Ерещенко, А. А. Жук // Наука - производству : Материалы международной научно-практической конференции, Мурманск, 24–27 марта 2015 года / Мурманский государственный технический университет. – Мурманск: Мурманский государственный технический университет, 2015. – С. 21-26. – EDN VFYHFR.

25. Ерещенко, В. В. Разработка исполнительных элементов воздухосмешивающей системы для программно-аппаратного комплекса поиска оптимальных режимов холодной сушки гидробионтов / В. В. Ерещенко, В. В. Яценко // Наука - производству : Материалы международной научно-практической конференции, Мурманск, 14–19 апреля 2017 года / Мурманский государственный технический университет. – Мурманск: Мурманский государственный технический университет, 2017. – С. 29-33. – EDN YOLFBH.

26. Ерещенко, В. В. Система управления на базе мобильного устройства под управлением операционной системы Android / В. В. Ерещенко, В. В. Яценко // Наука - производству : Материалы международной научно-практической конференции, Мурманск, 18–20 апреля 2018 года. – Мурманск: Мурманский государственный технический университет, 2018. – С. 35-40. – EDN YMBCST.

27. Ершов, М. А. Методика расчета кривых кинетики и динамики обезвоживания в процессах вяления и холодного копчения рыбы / М. А. Ершов, А. М. Ершов, О. А. Николаенко // Вестник МГТУ : труды Мурман. гос. техн. ун-та / Мурман. гос. техн. ун-т. – Мурманск, 2010. – Т. 13, № 4/2. – С. 947-950.

28. Ершов, М. А. Методика расчета процессов обезвоживания при холодном копчении и вялении рыбы / М. А. Ершов, О. А. Николаенко // Вестник ВГТА. Сер. Процессы и аппараты пищевых производств. – Воронеж, 2011. – № 1 (47). – С. 27-29.

29. Ершов, М. А. Расчетный метод определения влажности на поверхности рыбы в процессах обезвоживания / М. А. Ершов, А. М. Ершов, О. А. Николаенко // Вестник МГТУ : труды Мурман. гос. техн. ун-та / Мурман. гос. техн. ун-т. – Мурманск, 2006. – Т. 9, № 4. – С. 707-709.

30. Журтаева З.Д., Власенко О.М. Моделирование системы управления тепловым режимом сушильной установки // Сборник научных трудов кафедры автоматики и промышленной электроники. М.: Московский государственный университет дизайна и технологии, 2016. С. 27–30.

31. Земцовский А.Е., Сидоров Г.И. Разработка концепции математической модели прогнозирования качества сушки пиломатериалов // Системы. Методы. Технологии. 2017. № 2(34). С. 129–132.

32. Измерение и контроль воздушного потока в коптильных и сушильных установках [Электронный ресурс] / Ю. Т. Глазунов, А. М. Ершов, М. А. Ершов, В. А. Похольченко, И. Ю. Селяков // Наука и образование – 2012 : материалы междунар. науч.-техн. конф., Мурманск, 2-6 апр. 2012 г. / Мурман. гос. тех. ун-т. – Электрон. текст. дан. (МБ). – Мурманск : МГТУ, 2012. – 1 опт. Компакт-диск (CD- ROM). – С. 547-550.

33. Ионов, Н. А. Разработка системы подготовки воздуха для установки поиска режимов сушки пищевого сырья / Н. А. Ионов, В. В. Ерещенко // Современные эколого-биологические и химические исследования, техника и технология производств : МАТЕРИАЛЫ МЕЖДУНАРОДНОЙ НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ, в 2х частях, Мурманск, 07 апреля 2017 года / Мурманский государственный технический университет. Том 2. – Мурманск: Мурманский государственный технический университет, 2017. – С. 133-137. – EDN YOLGFK.



34. Кайченoв, А. В. Комплексная модернизация систем управления процессами тепловой обработки водных биоресурсов Арктики с использованием интеллектуальных технологий / А. В. Кайченoв, И. Г. Благовещенский. – Курск : Закрытое акционерное общество "Университетская книга", 2022. – 251 с. – ISBN 978-5-907627-36-9. – EDN QCTQSF.

35. Каркас сериализации Apache Thrift / М. В. Михайлова, К. Р. Валинурoв, А. В. Тимофеев, В. Ю. Шаврин // Научное сообщество студентов XXI столетия. Технические науки : Электронный сборник статей по материалам LI студенческой международной научно-практической конференции, Новосибирск, 30–10 марта 2017 года. Том 3(50). – Новосибирск: Ассоциация научных сотрудников "Сибирская академическая книга", 2017. – С. 84-89. – EDN YLQOCR.

36. Каталог продукции ОВЕН [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://owen.ru/catalog> (дата обращения 18.06.2023)

37. Конструкторское Бюро АГАВА . [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://www.kb-agava.ru/> (дата обращения 18.06.2023)

38. Лыков, А. В. Теория сушки. Учебное пособие. – М. : Энергия, 1968. – 472 с.: ил.

39. Математическое моделирование тепловых и влажностных процессов в камере обезвоживания пищевых продуктов / А. В. Кайченoв, В. В. Ерещенко, В. В. Яценко, И. Г. Благовещенский // Вестник Тверского государственного технического университета. Серия: Технические науки. – 2022. – № 4(16). – С. 76-87. – DOI 10.46573/2658-5030-2022-4-76-87. – EDN R1HFHK.

40. Многоконтурная система управления процессом конвективного обезвоживания рыбного сырья / Кайченoв А. В., Ерещенко В. В., Яценко В. В., Селяков И. Ю. // Вестник Тамбовского государственного технического университета. – 2023. – С. 254-262. DOI: 10.17277/vestnik.2023.02.pp.254-262 – EDN OPMDGF.

41. Моделирование процессов обезвоживания пищевого сырья в электромагнитном поле / О. Г. Бурдо, С. Г. Терзиев, И. И. Яровой, А. А. Борщ //

Вестник Воронежского государственного университета инженерных технологий. – 2013. – № 3(57). – С. 62-65. – EDN RGSRGF.

42. Моделирование процессов обезвоживания провесной и вяленой рыбы / М. А. Ершов, А. М. Ершов, Е. В. Лыжин [и др.] // Вестник Воронежского государственного университета инженерных технологий. – 2021. – Т. 83. – № 1(87). – С. 55-61. – DOI 10.20914/2310-1202-2021-1-55-61. – EDN VORRQC.

43. Модель представления метеорологических данных в задачах сбора и обработки информации о состоянии природной среды / А. Н. Мешков, И. А. Готюр, М. Ю. Рудь, И. А. Яременко // Современные проблемы гидрометеорологии и устойчивого развития Российской Федерации : Сборник тезисов Всероссийской научно-практической конференции, Санкт-Петербург, 14–15 марта 2019 года. – Санкт-Петербург: Российский государственный гидрометеорологический университет, 2019. – С. 131. – EDN ZBNFZZ.

44. Модернизация малогабаритной установки для поиска оптимальных технологических режимов сушки сырья / В. В. Ерещенко, И. Ю. Селяков, А. А. Маслов [и др.] // Техника и технологии: пути инновационного развития : сборник научных трудов 4-ой Международной научно-практической конференции, Курск, 30 июня 2014 года / Ответственный редактор: А.А. Горохов. – Курск: Закрытое акционерное общество "Университетская книга", 2014. – С. 110-114. – EDN SZJXJF.

45. Никитин А.А., Рябова Т.В., Поддубный Р.А., Василенок А.В. Сравнительный анализ графического и программно - ориентированного метода определения параметров влажного воздуха // Низкотемпературные и пищевые технологии в XXI веке : Материалы межд. научн.-техн. конференции, С-Пб.: Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, 2015. С. 361–363.

46. НПК РЭЛСИБ - российский производитель автономных регистраторов (логгеров), измерителей, датчиков температуры, влажности и других параметров. [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://relsib.com/> (дата обращения 18.06.2023)

47. Обзор методов многоцелевой оптимизации термической обработки продуктов / А. В. Столянов, А. В. Кайченев, А. А. Маслов, В. В. Ерещенко, [и др.] // Техника и технологии: пути инновационного развития : сборник научных трудов 4-ой Международной научно-практической конференции, Курск, 30 июня 2014 года / Ответственный редактор: А.А. Горохов. – Курск: Закрытое акционерное общество "Университетская книга", 2014. – С. 233-238. – EDN SZJXMH.

48. Обухов, А. Д. Алгоритмы обработки данных в автоматических системах управления на основе компьютерного зрения / А. Д. Обухов, К. И. Патуин, А. О. Назарова // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2022. – Т. 28, № 4. – С. 573 – 585. doi: 10.17277/vestnik.2022.04.pp.573-585.

49. Патент на полезную модель № 136962 U1 Российская Федерация, МПК А23В 4/03. Малогабаритная установка для поиска оптимальных технологических режимов сушки сырья : № 2013121893/13 : заявл. 13.05.2013 : опубл. 27.01.2014 / И. Ю. Селяков, А. В. Кайченев, А. А. Маслов [и др.] ; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Мурманский государственный технический университет". – EDN YKRGLW.

50. Патент на полезную модель № 196894 U1 Российская Федерация, МПК G01J 5/00. Устройство для непрерывного контроля теплового состояния электрического оборудования : № 2019133421 : заявл. 21.10.2019 : опубл. 19.03.2020 / А. Б. Власов, В. В. Ерещенко, В. В. Ерещенко ; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Мурманский государственный технический университет" (ФГБОУ ВО "МГТУ"). – EDN RBKNXZ.

51. Песков, Н. П. Математическое моделирование технологического процесса ректификации этаноламинов / Н. П. Песков, Н. А. Нажимова // Математические методы в технике и технологиях - ММТТ. – 2013. – № 9-1(59). – С. 183-184. – EDN UXBWHL.

52. Построение матрицы гомографии на основе произвольного количества ключевых точек / А. И. Ефимов, А. А. Логинов, М. Б. Никифоров, А. И. Новиков // Проблемы передачи и обработки информации в сетях и системах телекоммуникаций : Материалы 18-й Международной научно-технической конференции, Рязань, 26–28 октября 2015 года. – Рязань: Научно-техническое издательство "Горячая линия-Телеком", 2015. – С. 137-139. – EDN ULWDIP.

53. Применение моделирования режимов тепловой стерилизации для улучшения показателей качества консервной продукции / А. В. Столянов, А. В. Кайченев, А. А. Маслов, В. В. Ерещенко [и др.] // Вестник МГТУ. Труды Мурманского государственного технического университета. – 2015. – Т. 18, № 1. – С. 110-116. – EDN TVRTWB.

54. Программно-аппаратный комплекс для автоматического управления процессом подготовки сушильного агента с заданными параметрами температуры и влажности / А. В. Кайченев, В. В. Ерещенко, В. В. Яценко, И. Г. Благовещенский // Вестник Тверского государственного технического университета. Серия: Технические науки. – 2023. – № 1(17). – С. 41-53. – DOI 10.46573/2658-5030-2023-1-41-53. – EDN DFTDWP.

55. Разработка и исследование возможностей программно-аппаратного комплекса измерения температуры и влажности модельного объекта "Опытный" / В. В. Ерещенко, А. В. Кайченев, В. В. Яценко [и др.] // Наука и образование - 2020 : материалы всероссийской научно-практической конференции, Мурманск, 01 декабря 2020 года. – Мурманск: Мурманский государственный технический университет, 2021. – С. 12-17. – EDN IQTTMX.

56. Разработка интерфейса взаимодействия с контроллером программно-конфигурируемых сетей / Д. А. Чугреев, А. Е. Шкребец, А. Е. Шевель [и др.] // Современные проблемы науки и образования. – 2013. – № 3. – С. 83. – EDN RPOJNV.

57. Разработка климатической камеры для малогабаритной сушильной установки УПОР-М / В. В. Ерещенко, А. В. Столянов, М. А. Ершов, А. А. Жук //

Наука - производству : Материалы международной научно-практической конференции, Мурманск, 22–25 марта 2016 года / Мурманский государственный технический университет. – Мурманск: Мурманский государственный технический университет, 2016. – С. 43-47. – EDN WKRZOB.

58. Разработка систем автоматизации технологических процессов переработки водных биологических ресурсов Арктики на основе интеллектуальных технологий / А. В. Кайченев, В. В. Ерещенко, И. Г. Благовещенский [и др.] // Фабрика будущего: переход к передовым цифровым, интеллектуальным производственным технологиям, роботизированным системам для отраслей пищевой промышленности : Сборник научных докладов III Международной специализированной конференции - выставки, Москва, 29 марта 2022 года. – Курск: ЗАО «Университетская книга», 2022. – С. 138-141.

59. Разработка системы автоматического взвешивания на базе сигма-дельта АЦП НХ711 и микроконтроллера PIC16F876A / В. В. Ерещенко, И. Ю. Селяков, А. А. Маслов [и др.] // Развитие науки и образования в современном мире : Сборник научных трудов по материалам Международной научно-практической конференции: в 7 частях, Москва, 30 сентября 2014 года / ООО "АР-Консалт". – Москва: Общество с ограниченной ответственностью "АР-Консалт", 2014. – С. 107-112. – EDN SWQHFL.

60. Разработка системы кондиционирования воздуха в составе установки по поиску режимов обезвоживания рыбы / Н. А. Ионов, В. В. Ерещенко, А. А. Маслов, М. А. Ершов // Современные эколого-биологические и химические исследования, техника и технология производств : Материалы международной научно-практической конференции, Мурманск, 25 апреля 2018 года. – Мурманск: Мурманский государственный технический университет, 2018. – С. 238-243. – EDN YOANRJ.

61. Разработка энергоэффективных процессов конвективного обезвоживания рыбы / М. А. Ершов, А. М. Ершов, Ю. Т. Глазунов, И. Ю. Селяков // Рыбное хозяйство. – 2013. – № 6. – С. 105-107.

62. Реализация программы управления сушильной установкой для обеспечения комбинированных режимов обезвоживания с линейно изменяющимся временем релаксации рыбы / И. Ю. Селяков, А. А. Маслов, М. А. Ершов [и др.] // Рыбное хозяйство. – 2014. – № 3. – С. 126 – 128.

63. Рылов, С. А. OPC UA как стандарт передачи ПИОТ данных / С. А. Рылов, В. А. Холопов, И. Г. Благовещенский // Роговские чтения : сборник докладов научно-практической конференции с международным участием, Москва, 16 декабря 2022 года. – Курск: Закрытое акционерное общество "Университетская книга", 2023. – С. 344-350. – EDN RVJDХК.

64. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2019614710 Российская Федерация. Программа для платы управления поворотным механизмом системы тепловизионного контроля состояния электрооборудования и обследования электроустановок : № 2019613548 : заявл. 02.04.2019 : опубл. 10.04.2019 / В. В. Ерещенко, В. В. Ерещенко, А. Б. Власов ; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Мурманский государственный технический университет» (ФГБОУ ВО «МГТУ»). – EDN ZDCOKW.

65. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2019614708 Российская Федерация. Программа расчета степени открытия заслонок для процесса смешения воздуха : № 2019613544 : заявл. 02.04.2019 : опубл. 10.04.2019 / В. В. Ерещенко, В. В. Яценко ; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Мурманский государственный технический университет» (ФГБОУ ВО «МГТУ»). – EDN TWERMТ.

66. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2019614754 Российская Федерация. Программа управления для платы сбора данных : № 2019613527 : заявл. 02.04.2019 : опубл. 11.04.2019 / В. В. Ерещенко, В. В. Яценко ; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Мурманский

государственный технический университет» (ФГБОУ ВО «МГТУ»). – EDN HRHPGR.

67. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2019614760 Российская Федерация. Программа управления для платы управления включением и выключением холодильной машины : № 2019613496 : заявл. 02.04.2019 : опубл. 11.04.2019 / В. В. Ерещенко, В. В. Яценко ; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Мурманский государственный технический университет» (ФГБОУ ВО «МГТУ»). – EDN QKMAУW.

68. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2019614709 Российская Федерация. Программа управления для программно-аппаратного комплекса поиска оптимальных режимов холодной сушки гидробионтов : № 2019613546 : заявл. 02.04.2019 : опубл. 10.04.2019 / В. В. Ерещенко, В. В. Яценко ; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Мурманский государственный технический университет» (ФГБОУ ВО «МГТУ»). – EDN IRVVLY.

69. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2019614706 Российская Федерация. Программа управления для программно-аппаратного комплекса тепловизионного контроля состояния электрооборудования и обследования электроустановок : № 2019613541 : заявл. 02.04.2019 : опубл. 10.04.2019 / В. В. Ерещенко, В. В. Ерещенко, А. Б. Власов ; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Мурманский государственный технический университет» (ФГБОУ ВО «МГТУ»). – EDN ZIBKCB.

70. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2019614707 Российская Федерация. Программа управления системой воздухосмещения по беспроводному интерфейсу WI FI : № 2019613543 : заявл. 02.04.2019 : опубл. 10.04.2019 / В. В. Ерещенко, В. В. Яценко ; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего

образования «Мурманский государственный технический университет» (ФГБОУ ВО «МГТУ»). – EDN WIWLTH.

71. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2020660156 Российская Федерация. AutoCont Lite: SeekerC : № 2020619208 : заявл. 18.08.2020 : опубл. 28.08.2020 / А. А. Жук ; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Мурманский государственный технический университет» (ФГБОУ ВО «МГТУ»). – EDN DJYXCA.

72. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2019613771 Российская Федерация. Аналитический расчёт значений количества парциального давления при полном насыщении влажного воздуха в зависимости от основных климатических параметров наружного влажного воздуха в разные периоды года : № 2019612747 : заявл. 19.03.2019 : опубл. 22.03.2019 / К. М. Иванников. – EDN TWEJDV.

73. Сорокин А.С., Власенко О.М. Оптимизация работы системы Центрального кондиционера воздуха // Сборник научных трудов кафедры автоматики и промышленной электроники. М.: Московский государственный университет дизайна и технологии, 2016. С. 73–77.

74. Столянов, А. В. Компьютерное моделирование как перспективное направление оптимизации процесса тепловой стерилизации консервной продукции. Обзор существующих решений / А. В. Столянов, А. А. Жук, В. В. Ерещенко // Наука - производству : Материалы международной научно-практической конференции, Мурманск, 24–27 марта 2015 года / Мурманский государственный технический университет. – Мурманск: Мурманский государственный технический университет, 2015. – С. 59-63. – EDN VFYHST.

75. Стратегия развития рыбохозяйственного комплекса Российской Федерации на период до 2030 года // Федеральное агентство по рыболовству: сайт. – URL: <https://fish.gov.ru/wp-content/uploads/documents/files/proekt-strategiya-2030.pdf>. – Дата публикации: 1 июля 2017.



76. Филиппов, С. С. Использование протокола передачи данных "Protocol Buffers" / С. С. Филиппов // Россия молодая : Сборник материалов XI Всероссийской научно-практической конференции с международным участием, Кемерово, 16–19 апреля 2019 года – Кемерово: Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева, 2019. – С. 30115. – EDN XOMMRD.

77. Хабибулин, Д. Я. Реализация игрового проекта на Godot Engine / Д. Я. Хабибулин, А. А. Ольштейн // Инновации. Интеллект. Культура : материалы V Международной научно-практической конференции, посвященной 435-летию основания г. Тобольска, году Даниила Чулкова в г. Тобольске, Тобольск, 22 апреля 2022 года. – Тюмень: Тюменский индустриальный университет, 2022. – С. 195-199. – EDN UMGXTH.

78. Цифровые двойники в рамках концепции промышленного Интернета вещей / С. А. Рылов, О. В. Чистяков, М. В. Веселов, И. Г. Благовещенский [и др.] // Фабрика будущего: переход к передовым цифровым, интеллектуальным производственным технологиям, роботизированным системам для отраслей пищевой промышленности : Сборник научных докладов III Международной специализированной конференции - выставки, Москва, 29 марта 2022 года. – Курск: ЗАО «Университетская книга», 2022. – С. 300-307. – EDN LBROGP.

79. Честных, Е. С. Моделирование влажностного режима в автоматизированном гроубоксе / Е. С. Честных, М. С. Пешко // Автоматизация, мехатроника, информационные технологии : Материалы XII Международной научно-технической интернет-конференции молодых ученых, Омск, 17–18 мая 2022 года. – Омск: Омский государственный технический университет, 2022. – С. 24-26. – EDN CRALWO.

80. Шестаков, В. С. Применение технологии websocket в web-приложениях технологического назначения / В. С. Шестаков, А. С. Сагидуллин // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. – 2015. – Т. 58, № 4. – С. 328-330. – DOI 10.17586/0021-3454-2015-58-4-328-330. – EDN TOMQDF.

81. Шпак, А. А. Двухнаправленное соединение посредством протокола WebSocket / А. А. Шпак, Е. М. Патрушев // Ползуновский альманах. – 2014. – № 1. – С. 170-172. – EDN TBEIVL.
82. A client library for the Arduino Ethernet Shield that provides support for MQTT [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://github.com/knolleary/pubsubclient> (дата обращения 18.06.2023)
83. A neuro-fuzzy decoupling approach for real-time drying room control in meat manufacturing [Электронный ресурс]. — Режим доступа: [https://www.researchgate.net/publication/266857686\\_A\\_neuro-fuzzy\\_decoupling\\_approach\\_for\\_real-time\\_drying\\_room\\_control\\_in\\_meat\\_manufacturing](https://www.researchgate.net/publication/266857686_A_neuro-fuzzy_decoupling_approach_for_real-time_drying_room_control_in_meat_manufacturing) (дата обращения 18.06.2023)
84. A novel approach for quality control system using sensor fusion of infrared and visual image processing for laser sealing of food containers / A. Al-Habaibeh, F. Shi, N. Brown [et al.] // Measurement Science and Technology. – 2004. – Vol. 15, No. 10. – P. 1995-2000. – EDN HBJAVB.
85. A temperature-regulated circuit for feeding behavior / Sh. Qian, S. Yan, R. Pang [et al.] // Nature Communications. – 2022. – Vol. 13, No. 1. – P. 1-17. – DOI 10.1038/s41467-022-31917-w. – EDN UYEUUM.
86. Active stereo platform: online epipolar geometry update / A. Mohamed, Ph. Culverhouse, A. Cangelosi, Ch. Yang // Eurasip Journal on Image and Video Processing. – 2018. – Vol. 2018, No. 1. – P. 1-16. – DOI 10.1186/s13640-018-0292-8. – EDN LZIAIV.
87. Agapito, L. Self-Calibration of Rotating and Zooming Cameras / L. Agapito, E. Hayman, I. Reid // International Journal of Computer Vision. – 2001. – Vol. 45, No. 2. – P. 107-127. – EDN ARTORR.
88. Application of fuzzy logic in drying: A review [Электронный ресурс]. — Режим доступа: [https://www.researchgate.net/publication/347308649\\_Application\\_of\\_fuzzy\\_logic\\_in\\_drying\\_A\\_review](https://www.researchgate.net/publication/347308649_Application_of_fuzzy_logic_in_drying_A_review) (дата обращения 18.06.2023)

89. Application of infrared thermography and dielectric spectroscopy for controlling freezing process of raw potato / L. Cuibus, A. Fabbri, M. Castro-Giráldez, P. J. Fito // *Innovative Food Science & Emerging Technologies*. – 2014. – Vol. 24. – P. 80-87. – DOI 10.1016/j.ifset.2013.11.007. – EDN YFGGIF.
90. Aures, G.; Lübben, C. DDS vs. MQTT vs. VSL for IoT. *Network 2019*, 1, 1–5.
91. Becker, Oestreich, Hasse and Litz, "Fuzzy control for temperature and humidity in refrigeration systems," 1994 Proceedings of IEEE International Conference on Control and Applications, Glasgow, UK, 1994, pp. 1607-1612 vol.3, doi: 10.1109/CCA.1994.381476.
92. Cage: the Wayland kiosk [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://www.hjdskes.nl/projects/cage/> (дата обращения 18.06.2023)
93. Comparison of image registration methods for combining laparoscopic video and spectral image data / H. Köhler, A. Pfahl, Yu. Moulla [et al.] // *Scientific Reports*. – 2022. – Vol. 12, No. 1. – P. 1-12. – DOI 10.1038/s41598-022-20816-1. – EDN KKOLRY.
94. Dear ImGui: Bloat-free Graphical User interface for C++ with minimal dependencies [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://github.com/ocornut/imgui> (дата обращения 18.06.2023)
95. Decoupled control of temperature and relative humidity using a variable-air-volume HVAC system and non-interacting control [Электронный ресурс]. — Режим доступа: [https://www.researchgate.net/publication/224075519\\_Decoupled\\_control\\_of\\_temperature\\_and\\_relative\\_humidity\\_using\\_a\\_variable-air-volume\\_HVAC\\_system\\_and\\_non-interacting\\_control](https://www.researchgate.net/publication/224075519_Decoupled_control_of_temperature_and_relative_humidity_using_a_variable-air-volume_HVAC_system_and_non-interacting_control) (дата обращения 18.06.2023)
96. Defraeye, T. Advanced computational modelling for drying processes - A review / T. Defraeye // *Applied Energy*. – 2014. – Vol. 131. – P. 323-344. – DOI 10.1016/j.apenergy.2014.06.027. – EDN UUAQT.
97. Design for Fuzzy Decoupling Control System of Temperature and Humidity [Электронный ресурс]. — Режим доступа:

[https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-642-21402-8\\_38](https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-642-21402-8_38) (дата обращения 18.06.2023)

98. Eclipse Mosquitto: An open source MQTT broker [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://mosquitto.org> (дата обращения 18.06.2023).

99. Esfandiari Nia F., van Paassen D. A Simplified Graphical Model of Air Cooler Using Mollier Diagram and Implementation in a Design Tool // *Energy Sustainability*. 2008. V. 43208. P. 145–151.

100. Espressif Modules [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://www.espressif.com/en/products/modules> (дата обращения 18.06.2023).

101. GitHub: List of Open Source OPC UA Implementations [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://github.com/open62541/open62541/wiki/List-of-Open-Source-OPC-UA-Implementations> (дата обращения 18.06.2023)

102. GitHub: OpenDDS [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://github.com/objectcomputing/OpenDDS#documentation> (дата обращения 18.06.2023).

103. Godot Engine - Free and open source 2D and 3D game engine [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://godotengine.org/> (дата обращения 18.06.2023).

104. Hosseinpour, S. Application of Fuzzy Logic in Drying: A review / S. Hosseinpour, A. Martynenko // *Drying Technology*. – 2022. – Vol. 40, No. 5. – P. 797 – 826.

105. Image Matching from Handcrafted to Deep Features: A Survey / J. Ma, X. Jiang, A. Fan [et al.] // *International Journal of Computer Vision*. – 2021. – Vol. 129, No. 1. – P. 23-79. – DOI 10.1007/s11263-020-01359-2. – EDN PRAANS.

106. Industrial application of model predictive control to a milk powder spray drying plant [Электронный ресурс]. — Режим доступа: [https://www.researchgate.net/publication/312304337\\_Industrial\\_application\\_of\\_model\\_predictive\\_control\\_to\\_a\\_milk\\_powder\\_spray\\_drying\\_plant](https://www.researchgate.net/publication/312304337_Industrial_application_of_model_predictive_control_to_a_milk_powder_spray_drying_plant) (дата обращения 18.06.2023)

107. Jay, S. Assessment of industrial energy utilisation and efficiency of drying systems and the modelling of drying characteristics using neural networks / S. Jay, 1998. – 1 p. – EDN FUPBHV.

108. Kiranoudis, C.T., Maroulis, Z.B. and Marinos-Kouris, D. (1995) Heat and mass transfer model building in drying with multiresponse data. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 38, 463-480. doi:10.1016/0017-9310(94)00166-S

109. Liu, X. W. Design for Fuzzy Decoupling Control System of Temperature and Humidity / X.W. Liu, T. F. Dai // In *Advanced Research on Computer Science and Information Engineering: International Conference, CSIE 2011, Zhengzhou, China, May 21-22, 2011.* – 2011. – Part I. – P. 231 – 236.

110. Manjaro [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://manjaro.org/> (дата обращения 18.06.2023).

111. Minibson - Zero-dependency C++ BSON libraries [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://github.com/cyberguijarro/minibson> (дата обращения 18.06.2023)

112. miniz: Single C source file zlib-replacement library [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://github.com/richgel999/miniz> (дата обращения 18.06.2023)

113. Nebbione, G.; Calzarossa, M.C. Security of IoT application layer protocols: Challenges and findings. *Future Internet* 2020, 12, 55.

114. On a continuous-time system identification using optimization method [Электронный ресурс]. — Режим доступа: [https://www.researchgate.net/publication/4013054\\_On\\_a\\_continuous-time\\_system\\_identification\\_using\\_optimization\\_method](https://www.researchgate.net/publication/4013054_On_a_continuous-time_system_identification_using_optimization_method) (дата обращения 18.06.2023)

115. OpenCV - Open Computer Vision Library [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://opencv.org/> (дата обращения 18.06.2023)

116. Optimization of mass-transfer processes of fish convective dehydration / M. A. Ershov, I. Y. Selyakov, V. V. Ereshchenko, A. M. Ershov // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science : 5th International Conference "Arctic:*

History and Modernity" 18-19 March 2020, Saint-Petersburg, Russia, Saint-Petersburg, 18–19 марта 2020 года. Vol. 539. – Saint-Petersburg: Institute of Physics Publishing, 2020. – P. 012190. – DOI 10.1088/1755-1315/539/1/012190. – EDN THWBEF.

117. Pugin, K. V. Technologies of graphics information processing and output in general-purpose operating systems / K. V. Pugin, K. A. Mamrosenko, A. M. Giatsintov // Радиоэлектроника. Наносистемы. Информационные технологии. – 2019. – Vol. 11, No. 2. – P. 217-224. – DOI 10.17725/rensit.2019.11.217. – EDN LYZQXD.

118. Raspberry Pi 4 [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://www.raspberrypi.com/products/raspberry-pi-4-model-b/> (дата обращения 18.06.2023).

119. Research on Temperature and Humidity Decoupling Control of Constant Temperature and Humidity Test Chamber [Электронный ресурс]. — Режим доступа: [https://www.researchgate.net/publication/338433825\\_Research\\_on\\_Temperature\\_and\\_Humidity\\_Decoupling\\_Control\\_of\\_Constant\\_Temperature\\_and\\_Humidity\\_Test\\_Chamber](https://www.researchgate.net/publication/338433825_Research_on_Temperature_and_Humidity_Decoupling_Control_of_Constant_Temperature_and_Humidity_Test_Chamber) (дата обращения 18.06.2023)

120. Schmidt U. Decision support for greenhouse climate control using a computerised Mollier diagram //International Workshop on Models for Plant Growth and Control of Product Quality in Horticultural Production 654. 2003. P. 187–194.

121. Shum, H. Ye. Systems and Experiment Paper: Construction of Panoramic Image Mosaics with Global and Local Alignment / H. Ye. Shum, R. Szeliski // International Journal of Computer Vision. – 2000. – Vol. 36, No. 2. – P. 101-130. – EDN AGOENH.

122. Study on fuzzy decoupling control system [Электронный ресурс]. — Режим доступа: [https://www.researchgate.net/publication/346560640\\_Study\\_on\\_fuzzy\\_decoupling\\_control\\_system](https://www.researchgate.net/publication/346560640_Study_on_fuzzy_decoupling_control_system) (дата обращения 18.06.2023)

123. Sugimoto, A. A Linear Algorithm for Computing the Homography from Conics in Correspondence / A. Sugimoto // Journal of Mathematical Imaging and Vision. – 2000. – Vol. 13, No. 2. – P. 115-130. – EDN AKEXFR.

124. Urakov, A. L. The desired temperature value in the selected area of the body is the main condition for the effectiveness of drugs / A. L. Urakov, N. A. Urakova, A. P. Stolyarenko // Journal of Bio Innovation. – 2020. – Vol. 9, No. 4. – P. 499-504. – DOI 10.46344/JBINO.2020.v09i04.09. – EDN TCQKKN.

125. Vlasov, A. Development of a continuous thermal control device for highvoltage equipment / A. Vlasov, V. Ereschenko, T. Volkova // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science : 5th International Conference "Arctic: History and Modernity" 18-19 March 2020, Saint-Petersburg, Russia, Saint-Petersburg, 18–19 марта 2020 года. Vol. 539. – Saint-Petersburg: Institute of Physics Publishing, 2020. – P. 012135. – DOI 10.1088/1755-1315/539/1/012135. – EDN SUFEXV.

126. Wang, L. Research on Temperature and Humidity Decoupling Control of Constant Temperature and Humidity Test Chamber / L. Wang, Z. Zhu // In IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2020. – Vol. 711, No. 1. – P. 012104.

127. XMPP Software [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://xmpp.org/software/> (дата обращения 18.06.2023).

128. XMPP-IOT [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://www.xmpp-iot.org> (дата обращения 18.06.2023).

129. Yassein, M.B.; Shatnawi, M.Q. Application layer protocols for the Internet of Things: A survey. In Proceedings of the International Conference on Engineering and MIS (ICEMIS), Agadir, Morocco, 22–24 September 2016

130. Zhang, W. A Neuro-Fuzzy Decoupling Approach for Real-Time Drying Room Control in Meat Manufacturing / W. Zhang, H. Ma, S. X. Yang// Expert Systems with Applications. – 2015. – Vol. 42, No. 3. – P. 1039 – 1049.

## Список работ по теме диссертации

### *Статьи в изданиях, рецензируемых в международных базах данных (Scopus и WOS):*

1. Vlasov, A. Development of a continuous thermal control device for highvoltage equipment / A. Vlasov, V. Ereschenko, T. Volkova // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science : 5th International Conference "Arctic: History and Modernity" 18-19 March 2020, Saint-Petersburg, Russia, Saint-Petersburg, 18–19 марта 2020 года. Vol. 539. – Saint-Petersburg: Institute of Physics Publishing, 2020. – P. 012135. – DOI 10.1088/1755-1315/539/1/012135. – EDN SUFEXV.

2. Optimization of mass-transfer processes of fish convective dehydration / M. A. Ershov, I. Y. Selyakov, V. V. Ereshchenko, A. M. Ershov // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science : 5th International Conference "Arctic: History and Modernity" 18-19 March 2020, Saint-Petersburg, Russia, Saint-Petersburg, 18–19 марта 2020 года. Vol. 539. – Saint-Petersburg: Institute of Physics Publishing, 2020. – P. 012190. – DOI 10.1088/1755-1315/539/1/012190. – EDN THWBEF.

### *Публикации в изданиях, включенных в Перечень ВАК РФ:*

3. Математическое моделирование тепловых и влажностных процессов в камере обезвоживания пищевых продуктов / А. В. Кайченков, В. В. Ерещенко, В. В. Яценко, И. Г. Благовещенский // Вестник Тверского государственного технического университета. Серия: Технические науки. – 2022. – № 4(16). – С. 76-87. – DOI 10.46573/2658-5030-2022-4-76-87. – EDN R1HFHK.

4. Многоконтурная система управления процессом конвективного обезвоживания рыбного сырья / Кайченков А. В., Ерещенко В. В., Яценко В. В., Селяков И. Ю. // Вестник Тамбовского государственного технического



университета. – 2023. – С. 254-262. DOI: 10.17277/vestnik.2023.02.pp.254-262 – EDN OPMDGF.

5. Применение моделирования режимов тепловой стерилизации для улучшения показателей качества консервной продукции / А. В. Столянов, А. В. Кайченков, А. А. Маслов, В. В. Ерещенко [и др.] // Вестник МГТУ. Труды Мурманского государственного технического университета. – 2015. – Т. 18, № 1. – С. 110-116. – EDN TVRTWB.

6. Программно-аппаратный комплекс для автоматического управления процессом подготовки сушильного агента с заданными параметрами температуры и влажности / А. В. Кайченков, В. В. Ерещенко, В. В. Яценко, И. Г. Благовещенский // Вестник Тверского государственного технического университета. Серия: Технические науки. – 2023. – № 1(17). – С. 41-53. – DOI 10.46573/2658-5030-2023-1-41-53. – EDN DFTDWP.

***В прочих изданиях:***

7. Разработка систем автоматизации технологических процессов переработки водных биологических ресурсов Арктики на основе интеллектуальных технологий / А. В. Кайченков, В. В. Ерещенко, И. Г. Благовещенский [и др.] // Фабрика будущего: переход к передовым цифровым, интеллектуальным производственным технологиям, роботизированным системам для отраслей пищевой промышленности : Сборник научных докладов III Международной специализированной конференции - выставки, Москва, 29 марта 2022 года. – Курск: ЗАО «Университетская книга», 2022. – С. 138-141.

8. Столянов, А. В. Компьютерное моделирование как перспективное направление оптимизации процесса тепловой стерилизации консервной продукции. Обзор существующих решений / А. В. Столянов, А. А. Жук, В. В. Ерещенко // Наука - производству : Материалы международной научно-практической конференции, Мурманск, 24–27 марта 2015 года / Мурманский

государственный технический университет. – Мурманск: Мурманский государственный технический университет, 2015. – С. 59-63. – EDN VFYHST.

9. Модернизация малогабаритной установки для поиска оптимальных технологических режимов сушки сырья / В. В. Ерещенко, И. Ю. Селяков, А. А. Маслов [и др.] // Техника и технологии: пути инновационного развития : сборник научных трудов 4-ой Международной научно-практической конференции, Курск, 30 июня 2014 года / Ответственный редактор: А.А. Горохов. – Курск: Закрытое акционерное общество "Университетская книга", 2014. – С. 110-114. – EDN SZJXJF.

10. Ерещенко, В. В. Модернизация малогабаритной установки для поиска оптимальных технологических режимов сушки сырья. Разработка плат управления исполнительными механизмами и сбора данных с интерфейсом RS-232 и поддержкой протокола MODBUS RTU / В. В. Ерещенко, А. А. Жук // Наука - производству : Материалы международной научно-практической конференции, Мурманск, 24–27 марта 2015 года / Мурманский государственный технический университет. – Мурманск: Мурманский государственный технический университет, 2015. – С. 21-26. – EDN VFYHFR.

11. Обзор методов многоцелевой оптимизации термической обработки продуктов / А. В. Столянов, А. В. Кайченев, А. А. Маслов, В. В. Ерещенко, [и др.] // Техника и технологии: пути инновационного развития : сборник научных трудов 4-ой Международной научно-практической конференции, Курск, 30 июня 2014 года / Ответственный редактор: А.А. Горохов. – Курск: Закрытое акционерное общество "Университетская книга", 2014. – С. 233-238. – EDN SZJXMH.

12. Власов, А. Б. Разработка автономного извещателя контроля состояния высоковольтных систем судов на основе тепловизионной диагностики / А. Б. Власов, В. В. Ерещенко // Наука - производству : Материалы международной научно-практической конференции, Мурманск, 18–20 апреля 2018 года. – Мурманск: Мурманский государственный технический университет, 2018. – С. 9-11. – EDN YMBCBF.

13. Разработка и исследование возможностей программно-аппаратного комплекса измерения температуры и влажности модельного объекта "Опытный" / В. В. Ерещенко, А. В. Кайченков, В. В. Яценко [и др.] // Наука и образование - 2020 : материалы всероссийской научно-практической конференции, Мурманск, 01 декабря 2020 года. – Мурманск: Мурманский государственный технический университет, 2021. – С. 12-17. – EDN IQTTMX.

14. Ерещенко, В. В. Разработка исполнительных элементов воздухосмешивающей системы для программно-аппаратного комплекса поиска оптимальных режимов холодной сушки гидробионтов / В. В. Ерещенко, В. В. Яценко // Наука - производству : Материалы международной научно-практической конференции, Мурманск, 14–19 апреля 2017 года / Мурманский государственный технический университет. – Мурманск: Мурманский государственный технический университет, 2017. – С. 29-33. – EDN YOLFBH.

15. Разработка климатической камеры для малогабаритной сушильной установки УПОР-М / В. В. Ерещенко, А. В. Столянов, М. А. Ершов, А. А. Жук // Наука - производству : Материалы международной научно-практической конференции, Мурманск, 22–25 марта 2016 года / Мурманский государственный технический университет. – Мурманск: Мурманский государственный технический университет, 2016. – С. 43-47. – EDN WKRZOB.

16. Разработка системы автоматического взвешивания на базе сигма-дельта АЦП НХ711 и микроконтроллера PIC16F876A / В. В. Ерещенко, И. Ю. Селяков, А. А. Маслов [и др.] // Развитие науки и образования в современном мире : Сборник научных трудов по материалам Международной научно-практической конференции: в 7 частях, Москва, 30 сентября 2014 года / ООО "АР-Консалт". – Москва: Общество с ограниченной ответственностью "АР-Консалт", 2014. – С. 107-112. – EDN SWQHFL.

17. Разработка системы кондиционирования воздуха в составе установки по поиску режимов обезвоживания рыбы / Н. А. Ионов, В. В. Ерещенко, А. А. Маслов, М. А. Ершов // Современные эколого-биологические и химические исследования, техника и технология производств : Материалы международной

научно-практической конференции, Мурманск, 25 апреля 2018 года. – Мурманск: Мурманский государственный технический университет, 2018. – С. 238-243. – EDN YOANRJ.

18. Ионов, Н. А. Разработка системы подготовки воздуха для установки поиска режимов сушки пищевого сырья / Н. А. Ионов, В. В. Ерещенко // Современные эколого-биологические и химические исследования, техника и технология производств : МАТЕРИАЛЫ МЕЖДУНАРОДНОЙ НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ, в 2х частях, Мурманск, 07 апреля 2017 года / Мурманский государственный технический университет. Том 2. – Мурманск: Мурманский государственный технический университет, 2017. – С. 133-137. – EDN YOLGFK.

19. Власов, А. Б. Разработка устройства непрерывного ИК-контроля электрического оборудования на судах / А. Б. Власов, В. В. Ерещенко, В. В. Ерещенко // Наука и образование - 2018 : Материалы всероссийской научно-практической конференции, Мурманск, 15 ноября 2018 года. – Мурманск: Мурманский государственный технический университет, 2019. – С. 292-298. – EDN VHQNEG.

20. Ерещенко, В. В. Система управления на базе мобильного устройства под управлением операционной системы Android / В. В. Ерещенко, В. В. Яценко // Наука - производству : Материалы международной научно-практической конференции, Мурманск, 18–20 апреля 2018 года. – Мурманск: Мурманский государственный технический университет, 2018. – С. 35-40. – EDN YMBCST.

### ***Патенты, свидетельства о регистрации программ для ЭВМ:***

21. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2019614710 Российская Федерация. Программа для платы управления поворотным механизмом системы тепловизионного контроля состояния электрооборудования и обследования электроустановок : № 2019613548 : заявл. 02.04.2019 : опубл. 10.04.2019 / В. В. Ерещенко, В. В. Ерещенко, А. Б. Власов ;

заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Мурманский государственный технический университет» (ФГБОУ ВО «МГТУ»). – EDN ZDCOKW.

22. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2019614708 Российская Федерация. Программа расчета степени открытия заслонок для процесса смешения воздуха : № 2019613544 : заявл. 02.04.2019 : опубл. 10.04.2019 / В. В. Ерещенко, В. В. Яценко ; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Мурманский государственный технический университет» (ФГБОУ ВО «МГТУ»). – EDN TWERMТ.

23. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2019614754 Российская Федерация. Программа управления для платы сбора данных : № 2019613527 : заявл. 02.04.2019 : опубл. 11.04.2019 / В. В. Ерещенко, В. В. Яценко ; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Мурманский государственный технический университет» (ФГБОУ ВО «МГТУ»). – EDN HRHPGR.

24. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2019614760 Российская Федерация. Программа управления для платы управления включением и выключением холодильной машины : № 2019613496 : заявл. 02.04.2019 : опубл. 11.04.2019 / В. В. Ерещенко, В. В. Яценко ; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Мурманский государственный технический университет» (ФГБОУ ВО «МГТУ»). – EDN QKMAУW.

25. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2019614709 Российская Федерация. Программа управления для программно-аппаратного комплекса поиска оптимальных режимов холодной сушки гидробионтов : № 2019613546 : заявл. 02.04.2019 : опубл. 10.04.2019 / В. В. Ерещенко, В. В. Яценко ; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Мурманский

государственный технический университет» (ФГБОУ ВО «МГТУ»). – EDN IRVVLY.

26. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2019614706 Российская Федерация. Программа управления для программно-аппаратного комплекса тепловизионного контроля состояния электрооборудования и обследования электроустановок : № 2019613541 : заявл. 02.04.2019 : опубл. 10.04.2019 / В. В. Ерещенко, В. В. Ерещенко, А. Б. Власов ; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Мурманский государственный технический университет» (ФГБОУ ВО «МГТУ»). – EDN ZIBКСВ.

27. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2019614707 Российская Федерация. Программа управления системой воздухосмещения по беспроводному интерфейсу WI FI : № 2019613543 : заявл. 02.04.2019 : опубл. 10.04.2019 / В. В. Ерещенко, В. В. Яценко ; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Мурманский государственный технический университет» (ФГБОУ ВО «МГТУ»). – EDN WIWLTH.

28. Патент на полезную модель № 196894 U1 Российская Федерация, МПК G01J 5/00. Устройство для непрерывного контроля теплового состояния электрического оборудования : № 2019133421 : заявл. 21.10.2019 : опубл. 19.03.2020 / А. Б. Власов, В. В. Ерещенко, В. В. Ерещенко ; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Мурманский государственный технический университет" (ФГБОУ ВО "МГТУ"). – EDN RBKNXZ.

## Список иллюстративного материала

- Рисунок 1.1 – Типичная кривая процесса сушки
- Рисунок 1.2 – Система управления температурой и влажностью
- Рисунок 1.3 – Система управления температурой и влажностью с компенсирующей развязкой
- Рисунок 1.4 – Схема моделирования системы управления температурой и влажностью с компенсирующей развязкой
- Рисунок 1.5 – Применение нечеткой логики в системах управления процессами обезвоживания
- Рисунок 1.6 – Дорожная карта для будущих исследований нечеткой логики в технологии сушки
- Рисунок 1.7 – Типовая схема управления сушильной камерой
- Рисунок 2.1 – Программно-целевая модель исследований
- Рисунок 2.2 – Внешний вид установки для исследования режимов сушки сырья
- Рисунок 2.3 – Система управления УПОР-М
- Рисунок 2.4 – Структурная схема системы управления температурой
- Рисунок 2.5 – Форма для задания параметров технологического процесса одной секции
- Рисунок 2.6 – Нагревательный элемент на базе резисторов ПЭВ открытого и канального типа
- Рисунок 2.7 – Генератор тумана
- Рисунок 2.8 – Секция подготовки сушильного агента
- Рисунок 2.9 – Автоматическая заслонка круглого сечения
- Рисунок 2.10 – Обмен данными по протоколу MQTT
- Рисунок 2.11 – Древовидная иерархическая структура каналов
- Рисунок 2.12 – Структура предлагаемого бинарного формата передачи данных
- Таблица 2.1 – Используемые типы данных в формате BSON

Рисунок 2.13 – Результат кодирования заданной структуры в BSON-объект

Рисунок 2.14 – Результат кодирования BSON-объекта в формате BTF без сжатия

Рисунок 2.15 – Результат кодирования BSON-объекта в формате BTF с сжатием

Рисунок 2.16 – Структура пакета для передачи данных по частям

Рисунок 2.17 – Виды пакетов для передачи данных по частям в бинарном представлении

Рисунок 2.18 – Структура устройства для взаимодействия оконечных устройств с системой управления по протоколу MQTT в формате BTF

Рисунок 2.19 – Структура создаваемых устройством каналов

Рисунок 2.20 – Web-интерфейс конфигурирования устройства

Рисунок 2.21 – Структурная схема шестнадцати канального модуля управления заслонками

Таблица 2.2 – Система команд и вид данных шаблона для модуля управления заслонками

Рисунок 2.22 – Структурная схема шестнадцати канального модуля управления симисторами

Таблица 2.3 – Система команд и вид данных шаблона для модуля управления симисторами

Рисунок 2.23 – Структурная схема восьмиканального модуля реле

Рисунок 2.24 – Внешний вид восьмиканального модуля реле

Таблица 2.4 – Система команд и вид данных шаблона для восьмиканального модуля реле

Таблица 2.5 – Характеристики ПВТ100

Таблица 2.6 – Система команд и вид данных шаблона для ПВТ100

Таблица 2.7 – Характеристики SHT21

Рисунок 2.25 – Структурна схема модуля сбора данных

Рисунок 2.26 – Корпус для датчика температуры и влажности SHT21



Рисунок 2.27 – Восьми канальный модуль сбора данных по температуре и относительной влажности

Таблица 2.8 – Система команд и вид данных шаблона для модуля сбора данных

Рисунок 2.28 – Крепление тензометрического датчика

Рисунок 2.29 – Чаша для подвешивания продукта

Рисунок 2.30 – Крепление массоизмерительной системы

Рисунок 2.31 – Корпус для размещения управляющей платы на креплении

Рисунок 2.32 – Внешний вид конструкции массоизмерительной системы и ее размещение внутри секции сушки

Рисунок 2.33 – Структурная схема массоизмерительной системы

Таблица 2.9 – Система команд и вид данных шаблона для массоизмерительной системы

Таблица 2.10 – Основные характеристики счетчика Peasefair PZEM-016

Рисунок 2.34 – Внешний вид счетчика Peasefair PZEM-016

Таблица 2.11 – Система команд и вид данных шаблона для ПВТ100

Рисунок 2.35 – Структурная схема устройства непрерывного бесконтактного измерения температуры

Рисунок 2.36 – Устройство для непрерывного бесконтактного измерения температуры поверхности продукта

Рисунок 2.37 – Web-интерфейс конфигурирования устройства

Таблица 2.12 – Система команд и вид данных устройства для непрерывного бесконтактного измерения температуры

Рисунок 2.38 – Структурная схема программно-аппаратного решения для управления процессом

Рисунок 2.39 – Структурная схема взаимодействия с интерфейсом через драйвер

Рисунок 2.40 – Внешний вид разработанного управляющего компьютера

Рисунок 2.41 – Главное окно программы во время работы процесса

Рисунок 2.42 – Меню секции во время работы процесса

Рисунок 2.43 – Окно ввода параметров процесса

Рисунок 2.44 – Окно ввода параметров процесса

Рисунок 2.45 – Окно настройки регулятора температуры в секции

Рисунок 2.46 – Окно просмотра технологических параметров

Рисунок 2.47 – Окно калибровки массоизмерительной системы

Рисунок 2.48 – Окно конфигурирования системы тепловизионного анализа

Рисунок 2.49 – Структурная схема системы автоматического управления процессом обезвоживания рыбного сырья

Рисунок 3.1 – Структурная схема расчета относительной влажности

Рисунок 3.2 – Структурная схема расчета влагосодержания

Рисунок 3.3 – Структурная схема расчета удельной энтальпии влажного воздуха

Рисунок 3.4 – Процесс нагрева на I-d диаграмме влажного воздуха

Рисунок 3.5 – Структурная схема модели процесса нагрева на I-d диаграмме влажного воздуха

Рисунок 3.6 – Процесс охлаждения на I-d диаграмме влажного воздуха: процесс идеального охлаждения без изменения влагосодержания (а); процесс идеального охлаждения с изменением влагосодержания (б); процесс реального охлаждения (в)

Рисунок 3.7 – Структурная схема модели процесса идеального охлаждения на I-d диаграмме влажного воздуха

Рисунок 3.8 – Структурная схема изменения влагосодержания

Рисунок 3.9 – Процесс смешения на I-d диаграмме влажного воздуха без выпадения конденсата

Рисунок 3.10 – Процесс смешения на I-d диаграмме влажного воздуха с выпадением конденсата

Рисунок 3.11 – Структурная схема процесса смешения на I-d диаграмме влажного воздуха с выпадением конденсата

Рисунок 3.12 – Структурная схема поиска параметров влажного воздуха на линии насыщения  $\varphi = 100\%$  с заданной удельной энтальпией

Рисунок 3.13 – Процесс увлажнения на I-d диаграмме влажного воздуха

Рисунок 3.14 – Структурная схема изотермического увлажнения

Рисунок 3.15 – Структурная схема адиабатического увлажнения

Рисунок 3.16 – Графический интерфейс модуля расчета параметров id-диаграммы для адиабатического увлажнения

Рисунок 3.17 – Результаты эксперимента по адиабатическому увлажнению

Рисунок 3.18 – Графический интерфейс модуля расчета параметров id-диаграммы для процесса нагрева или охлаждения

Рисунок 3.19 – Результаты эксперимента по нагреву

Рисунок 3.20 – Структурная схема камеры сушки как объекта регулирования

Рисунок 3.21 – Графики переходных процессов при определении коэффициентов экспериментальной передаточной функции по температуре

Рисунок 3.22 – Графики переходных процессов при определении коэффициентов экспериментальной передаточной функции по влагосодержанию

Рисунок 3.23 – Переходные процессы при изменении воздействий

Рисунок 3.24 – Графики переходных процессов при определении коэффициентов экспериментальной передаточной функции  $W_{св.2}(p)$

Рисунок 3.25 – Структурная схема сравнения переходных процессов, полученных с применением теоретической и экспериментальной модели

Рисунок 3.26 – Результаты сравнения переходных процессов теоретической и экспериментальной моделей по каналу «температура приточного воздуха ( $T_{прит.}$ ) – температура воздуха в секции ( $T_{кам.}$ )

Рисунок 3.27 – Результаты сравнения переходных процессов теоретической и экспериментальной моделей по каналу «влагосодержание приточного воздуха ( $d_{прит.}$ ) – влагосодержание воздуха в секции ( $d_{кам.}$ )

Рисунок 3.28 – Результаты сравнения переходных процессов теоретической и экспериментальной моделей по каналу «влагосодержание увлажненного воздуха ( $d_{увл.}$ ) – изменение температуры в секции ( $T_{увл.}$ )

Рисунок 3.29 – Графики экспериментального исследования температурных и влажностных процессов

Рисунок 3.30 – Функциональные блоки для численного моделирования

Рисунок 3.30 – Структурная схема при моделировании процесса холодной сушки гидробионтов по температуре и влагосодержанию

Рисунок 3.31 – Переходные процессы по температуре при моделировании процесса и эксперименте

Рисунок 3.32 – Переходные процессы по влагосодержанию при моделировании процесса и эксперименте

Таблица 3.1 – Результаты оценки эффективности регулятора контура температуры влагосодержания

Рисунок 3.33 – Система передачи видеопотока в формате VTF

Рисунок 3.34 – Видеокадр в виде BSON-объекта

Рисунок 3.35 – Результаты эксперимента передачи видеопотока в формате VTF без сжатия

Рисунок 3.36 – Результаты эксперимента передачи видеопотока в формате VTF с сжатием

Рисунок 3.37 – Система передачи видеопотока в формате VTF с использованием отладочной платы ESP32-CAM AI Thinker Wi-Fi

Рисунок 3.38 – Результаты эксперимента передачи видеопотока в формате VTF без сжатия по частям

Рисунок 3.39 – Результаты эксперимента передачи видеопотока в формате VTF с сжатием по частям

Рисунок 3.40 – Изменение температуры поверхности во втором периоде кривой кинетики

Рисунок 3.41 – Система технического зрения для контроля температуры поверхности

Рисунок 3.42 – Пример работы алгоритма билинейная интерполяция

Рисунок 3.43 – Визуализация температурного поля внутри камеры сушки

Рисунок 3.44 – Совмещение изображений видимого и инфракрасного спектра

Рисунок 3.45 – Шаблон на изображении с постобработкой

Рисунок 3.46 – Сопоставление образов шаблона

Рисунок 3.47 – Методы контроля температуры поверхности

Рисунок 3.48 – Компьютерная модель на базе Godot

Рисунок 3.49 – График временной зависимости влагосодержания при проведении эксперимента

Рисунок 3.50 – График временных зависимостей температуры при проведении эксперимента

Рисунок 3.51 – График временных зависимостей относительной влажности, температуры и влагосодержания при проведении эксперимента

Рисунок 3.52 – id-диаграмма при проведении эксперимента

Рисунок 3.53 – Температура поверхности рыбного сырья

Рисунок 3.54 – График изменения массы рыбного сырья в процессе обезвоживания

Рисунок 3.55 – Структурная схема системы с применением адаптивных режимов и модуля аналитики

## ПРИЛОЖЕНИЕ 1 – Акт внедрения программы для ЭВМ «Модуль расчета потерь массы сырья»

УТВЕРЖДАЮ:

Директор ООО «Интро»

183010, г.Мурманск,

ул. Спортивная д.13.

А.Ю. Ильин

» 2014 г.



### АКТ ВНЕДРЕНИЯ

#### программы для ЭВМ «Модуль расчета потерь массы сырья»

В учебно-экспериментальном цехе МГТУ в блоке системы автоматического управления установки для поиска оптимальных режимов малогабаритной (УПОР-М) установлена и протестирована программа для ЭВМ “ Модуль расчета потерь массы сырья ”. Программа разработана в рамках ГБ НИР № ГР01200900799 "Комплексная модернизация систем контроля и управления процессами стерилизации и копчения" МГТУ. Авторами программы являются: мл. научн. сотр. кафедры АиВТ Селяков И.Ю.; ведущий электроник кафедры АиВТ Аминов В.А.; канд. техн. наук, ст. научн. сотр. кафедры АиВТ Власов А.В.; канд. техн. наук, ст. научн. сотр. кафедры АиВТ Кайченев А.В.; научн. сотр. кафедры АиВТ Власова А.Р., аспирант кафедры АиВТ Ерещенко В.В.

В алгоритме реализован блок подсчета потерь массы сырья за время процесса копчения или вяления рыбы. Программируемый логический контроллер подает питание и прогревает датчики веса в течение определенного времени. Снимаются показания нормированного сигнала, приходящего на АЦП, вычисляется текущая масса рыбы и потеря массы за процесс, затем питание с датчиков отключается. Алгоритм работы программы разработан на языке CFC (Continuous Function Chart). Расчитанные переменные данная программа отправляет по 485 интерфейсу в модуль сбора данных МСД для записи на карту памяти.

Установка для поиска оптимальных режимов малогабаритная используется ООО «Интро» для разработки режимов производства вяленой, копченой рыбы.

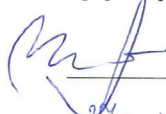
Начальник учебно-экспериментального цеха		Гроховский В.А.
Младший научный сотрудник кафедры АиВТ		Селяков И.Ю.
Старший научный сотрудник кафедры АиВТ		Кайченев А.В.
Старший научный сотрудник кафедры АиВТ		Власов А.В.
Ведущий электроник кафедры АиВТ		Аминов В.А.
Научный сотрудник кафедры АиВТ		Власова А.В.
Аспирант кафедры АиВТ		Ерещенко В.В.



## ПРИЛОЖЕНИЕ 2 – Акт о внедрении результатов НИР «Исследование, разработка и модернизация систем автоматического управления технологическими и производственными процессами»


ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ  
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«МУРМАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»  
(ФГАОУ ВО «МГТУ»)

СОГЛАСОВАНО:  
Проректор по НР

 К.Б. Аллояров  
«24» июня 2022 г.



УТВЕРЖДАЮ:  
Проректор по УР и молодежной  
политике

 В.В. Яценко  
«24» июня 2022 г.

АКТ 04/22  
о внедрении результатов результаты НИР в учебный процесс  
(вид деятельности\*)

1. Наименование предложения для внедрения (научные разработки и другие результаты научно-исследовательской деятельности) программно-аппаратный комплекс для исследования компьютерных систем управления на базе процесса сушки гидробионтов, НИР №1.01/21 (1210602000030-9) «Исследование, разработка и модернизация систем автоматического управления технологическими и производственными процессами»

2. Кем предложена разработка \_\_\_\_\_  
Гришкина Виктория Анатольевна, студентка группы ИВТ618о-1, ИАТ  
Ерещенко Виктор Валерьевич, старший преподаватель кафедры АиВТ, ИМА  
(Ф.И.О., должность, подразделение)

3. Краткая аннотация разработки \_\_\_\_\_  
Спроектирован и реализован графический пользовательский интерфейс для программно-аппаратного комплекса поиска оптимальных режимов холодной сушки гидробионтов  
Разработка велась на языке программирования C++ под операционную систему Linux Manjaro с использованием библиотек с открытым исходным кодом ImGui, ImPlot, OpenGL, SDL  
(характеристика результата, сделанный вывод)

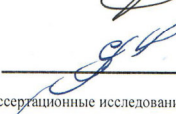
4. Где и когда внедрено: МГТУ, кафедра автоматизации и вычислительной техники,  
дисциплины: Компьютерные системы управления  
(наименование производственного подразделения предприятия)

5. Эффективность от внедрения (повышение уровня рентабельности, эффективности производственной деятельности предприятия и т.д.) \_\_\_\_\_  
повышение компетентности в области компьютерных систем управления

6. Замечания, предложения \_\_\_\_\_

Протокол заседания кафедры АиВТ от 22 июня 2022 г. № 10

Заведующий кафедрой  Кайченов Александр Вячеславович

Декан факультета  Березенко Сергей Дмитриевич

\* - научная стажировка, диссертационные исследования, результаты НИР, НИОКР

# ПРИЛОЖЕНИЕ 3 – Патент на полезную модель «Устройство для непрерывного контроля теплового состояния электрического оборудования»

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

(19) **RU** (11)**196 894**<sup>(13)</sup> **U1**(51) МПК  
G01J 5/00 (2006.01)ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА  
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ

## (12) ОПИСАНИЕ ПОЛЕЗНОЙ МОДЕЛИ К ПАТЕНТУ

(52) СПК  
G01J 5/00 (2020.01)

(21)(22) Заявка: 2019133421, 21.10.2019

(24) Дата начала отсчета срока действия патента:  
21.10.2019Дата регистрации:  
19.03.2020

Приоритет(ы):

(22) Дата подачи заявки: 21.10.2019

(45) Опубликовано: 19.03.2020 Бюл. № 8

Адрес для переписки:

183010, г. Мурманск, ул. Спортивная, 13,  
ФГБОУ ВО "Мурманский государственный  
технический университет", патентоведу

(72) Автор(ы):

Власов Анатолий Борисович (RU),  
Ерещенко Виктор Валерьевич (RU),  
Ерещенко Валерий Викторович (RU)

(73) Патентообладатель(и):

Федеральное государственное бюджетное  
образовательное учреждение высшего  
образования "Мурманский государственный  
технический университет" (ФГБОУ ВО  
"МГТУ") (RU)(56) Список документов, цитированных в отчете  
о поиске: RU 2625715 С1, 18.07.2017. ВУ 6044  
С1, 30.03.2004. RU 2012114455 А, 12.04.2012. JP  
2006153411 А, 15.06.2006. US 20170054923 А1,  
23.02.2017.

(54) Устройство для непрерывного контроля теплового состояния электрического оборудования

(57) Реферат:

Полезная модель относится к технике контроля теплового состояния узлов и элементов электрического оборудования и может быть использована в судоремонте, энергетике, машиностроении. Заявленное устройство для непрерывного контроля теплового состояния электрического оборудования содержит корпус с возможностью его установки в место визуализации электрического оборудования и ЭВМ-оператора. Внутри корпуса размещены источник питания, модуль видеокамеры, модуль ИК-камеры и блок обработки информации и сигнализации. Модуль видеокамеры, модуль ИК-камеры и блок обработки информации и

сигнализации электрически подсоединены к источнику питания. Блок обработки информации и сигнализации представляет собой электрическую схему и включает микроконтроллер (МК). Модули видеокамеры и ИК-камеры электрически подключены к электрической схеме блока обработки информации и сигнализации. Технический результат - обеспечение непрерывного контроля теплового состояния электрического оборудования в процессе его эксплуатации под нагрузкой и своевременное выявление возникающих тепловых дефектов. 2 з.п. ф-лы, 1 ил.

RU 196894 U1

RU 196894 U1



# ПРИЛОЖЕНИЕ 4 – Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ «Программа управления для программно-аппаратного комплекса тепловизионного контроля состояния электрооборудования и обследования электроустановок»

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



RU 2019614706

ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА  
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ

## ГОСУДАРСТВЕННАЯ РЕГИСТРАЦИЯ ПРОГРАММЫ ДЛЯ ЭВМ

Номер регистрации (свидетельства):  
2019614706

Дата регистрации: 10.04.2019

Номер и дата поступления заявки:  
2019613541 02.04.2019

Дата публикации и номер бюллетеня:  
10.04.2019 Бюл. № 4

Контактные реквизиты:  
(8152) 403430, plyasunoval@mstu.edu.ru

Автор(ы):  
Ерещенко Виктор Валерьевич (RU),  
Ерещенко Валерий Викторович (RU),  
Власов Анатолий Борисович (RU)

Правообладатель(и):  
Федеральное государственное бюджетное  
образовательное учреждение высшего  
образования «Мурманский государственный  
технический университет» (ФГБОУ ВО  
«МГТУ») (RU)

Название программы для ЭВМ:

**Программа управления для программно-аппаратного комплекса тепловизионного контроля состояния электрооборудования и обследования электроустановок**

Реферат:

Программа предназначена для осуществления тепловизионного контроля состояния электрооборудования и обследования электроустановок. Используется в программно-аппаратном комплексе тепловизионного контроля состояния электрооборудования и обследования электроустановок. Программа обеспечивает выполнение следующих функций: позволяет производить оценку технического состояния электрооборудования в процессе его работы, задавать зоны контроля и постоянно мониторить соответствие температурному режиму.

Язык программирования: C++

Объем программы для ЭВМ: 8,64 Кб

# ПРИЛОЖЕНИЕ 5 – Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ «Программа управления системой воздухосмещения по беспроводному интерфейсу Wi-Fi»

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



RU 2019614707

ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА  
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ

## ГОСУДАРСТВЕННАЯ РЕГИСТРАЦИЯ ПРОГРАММЫ ДЛЯ ЭВМ

<p>Номер регистрации (свидетельства): 2019614707</p> <p>Дата регистрации: 10.04.2019</p> <p>Номер и дата поступления заявки: 2019613543 02.04.2019</p> <p>Дата публикации и номер бюллетеня: 10.04.2019 Бюл. № 4</p> <p>Контактные реквизиты: (8152) 403430, plyasunova@mstu.edu.ru</p>	<p>Автор(ы): Ерещенко Виктор Валерьевич (RU), Яценко Виктория Владимировна (RU)</p> <p>Правообладатель(и): Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Мурманский государственный технический университет» (ФГБОУ ВО «МГТУ») (RU)</p>
---	---

Название программы для ЭВМ:  
Программа управления системой воздухосмещения по беспроводному интерфейсу WI FI

**Реферат:**  
Программа предназначена для управления системой воздухосмещения по беспроводному интерфейсу WiFi. Используется в программно-аппаратном комплексе поиска оптимальных режимов холодной сушки гидробионтов. Программа обеспечивает выполнение следующих функций: реализует управление по беспроводному интерфейсу WiFi системой воздухосмещения в ручном режиме, обеспечивает визуализацию состояния заслонок и холодильной машины.

**Язык программирования:** Object Pascal

**Объем программы для ЭВМ:** 16,9 Кб

# ПРИЛОЖЕНИЕ 6 – Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ «Программа расчета степени открытия заслонок для процесса смешения воздуха»

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

**RU 2019614708**

ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА  
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ

## ГОСУДАРСТВЕННАЯ РЕГИСТРАЦИЯ ПРОГРАММЫ ДЛЯ ЭВМ

<p>Номер регистрации (свидетельства): 2019614708</p> <p>Дата регистрации: 10.04.2019</p> <p>Номер и дата поступления заявки: 2019613544 02.04.2019</p> <p>Дата публикации и номер бюллетеня: 10.04.2019 Бюл. № 4</p> <p>Контактные реквизиты: (8152) 403430, plyasunova@mstu.edu.ru</p>	<p>Автор(ы): Ерещенко Виктор Валерьевич (RU), Яценко Виктория Владимировна (RU)</p> <p>Правообладатель(и): Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Мурманский государственный технический университет» (ФГБОУ ВО «МГТУ») (RU)</p>
---	---

Название программы для ЭВМ:

**Программа расчета степени открытия заслонок для процесса смешения воздуха**

**Реферат:**

Программа предназначена для расчета степени открытия заслонок процесса смешения воздуха. Используется в программно-аппаратном комплексе поиска оптимальных режимов холодной сушки гидробионтов. Программа обеспечивает выполнение следующих функций: производит расчет степени открытия заслонок воздухосмешивающей системы, обеспечивает визуализацию процесса смешения.

**Язык программирования:** Object Pascal

**Объем программы для ЭВМ:** 11,3 Кб

# ПРИЛОЖЕНИЕ 7 – Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ «Программа управления для программно-аппаратного комплекса поиска оптимальных режимов холодной сушки гидробионтов»

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

**RU 2019614709**

ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА  
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ

## ГОСУДАРСТВЕННАЯ РЕГИСТРАЦИЯ ПРОГРАММЫ ДЛЯ ЭВМ

<p>Номер регистрации (свидетельства): 2019614709</p> <p>Дата регистрации: 10.04.2019</p> <p>Номер и дата поступления заявки: 2019613546 02.04.2019</p> <p>Дата публикации и номер бюллетеня: 10.04.2019 Бюл. № 4</p> <p>Контактные реквизиты: (8152) 403430, <a href="mailto:plyasunoval@mstu.edu.ru">plyasunoval@mstu.edu.ru</a></p>	<p>Автор(ы): Ерещенко Виктор Валерьевич (RU), Яценко Виктория Владимировна (RU)</p> <p>Правообладатель(и): Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Мурманский государственный технический университет» (ФГБОУ ВО «МГТУ») (RU)</p>
---	---

Название программы для ЭВМ:

**Программа управления для программно-аппаратного комплекса поиска оптимальных режимов холодной сушки гидробионтов**

**Реферат:**

Программа предназначена для управления программно-аппаратным комплексом поиска оптимальных режимов холодной сушки гидробионтов. Программа обеспечивает выполнение следующих функций: реализует алгоритм комбинированного метода холодной сушки и обеспечивает связь с элементами программно-аппаратного комплекса по протоколу ModbusRTU.

**Язык программирования:** Object Pascal

**Объем программы для ЭВМ:** 38,1 Кб

# ПРИЛОЖЕНИЕ 8 – Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ «Программа для платы управления поворотным механизмом системы тепловизионного контроля состояния электрооборудования и обследования электроустановок»

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

**RU 2019614710**

ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА  
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ

## ГОСУДАРСТВЕННАЯ РЕГИСТРАЦИЯ ПРОГРАММЫ ДЛЯ ЭВМ

Номер регистрации (свидетельства):  
2019614710

Дата регистрации: 10.04.2019

Номер и дата поступления заявки:  
2019613548 02.04.2019

Дата публикации и номер бюллетеня:  
10.04.2019 Бюл. № 4

Контактные реквизиты:  
(8152) 403430, plyasunova@mstu.edu.ru

Автор(ы):

Ерещенко Виктор Валерьевич (RU),  
Ерещенко Валерий Викторович (RU),  
Власов Анатолий Борисович (RU)

Правообладатель(и):

Федеральное государственное бюджетное  
образовательное учреждение высшего  
образования «Мурманский государственный  
технический университет» (ФГБОУ ВО  
«МГТУ») (RU)

Название программы для ЭВМ:

Программа для платы управления поворотным механизмом системы тепловизионного контроля состояния электрооборудования и обследования электроустановок

Реферат:

Программа предназначена для управления поворотным механизмом системы тепловизионного контроля состояния электрооборудования и обследования электроустановок. Используется в программно-аппаратном комплексе тепловизионного контроля состояния электрооборудования и обследования электроустановок. Программа обеспечивает выполнение следующих функций: обеспечивает связь с управляющим ПК по протоколу ModbusRTU, выдает управляющие сигналы на драйвер шагового двигателя, ведет опрос концевых выключателей поворотного механизма.

Язык программирования: C++

Объем программы для ЭВМ: 8,64 Кб

# ПРИЛОЖЕНИЕ 9 – Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ «Программа управления для платы сбора данных»

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

**RU 2019614754**

ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА  
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ

## ГОСУДАРСТВЕННАЯ РЕГИСТРАЦИЯ ПРОГРАММЫ ДЛЯ ЭВМ

<p>Номер регистрации (свидетельства): 2019614754</p> <p>Дата регистрации: 11.04.2019</p> <p>Номер и дата поступления заявки: 2019613527 02.04.2019</p> <p>Дата публикации и номер бюллетеня: 11.04.2019 Бюл. № 4</p> <p>Контактные реквизиты: (8152) 403430, plyasunoval@mstu.edu.ru</p>	<p>Автор(ы): Ерещенко Виктор Валерьевич (RU), Яценко Виктория Владимировна (RU)</p> <p>Правообладатель(и): Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Мурманский государственный технический университет» (ФГБОУ ВО «МГТУ») (RU)</p>
--	---

Название программы для ЭВМ:  
**Программа управления для платы сбора данных**

**Реферат:**

Программа предназначена для управления платой сбора данных. Используется в программно-аппаратном комплексе поиска оптимальных режимов холодной сушки гидробионтов. Программа обеспечивает выполнение следующих функций: обеспечивает связь с управляющим ПК по протоколу ModbusRTU, ведет опрос датчиков температуры и влажности, организует индикацию состояния микроконтроллера.

**Язык программирования:** C++

**Объем программы для ЭВМ:** 10,3 Кб

# ПРИЛОЖЕНИЕ 10 – Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ «Программа управления для платы управления включением и выключением холодильной машины»

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

**RU 2019614760**

ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА  
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ

## ГОСУДАРСТВЕННАЯ РЕГИСТРАЦИЯ ПРОГРАММЫ ДЛЯ ЭВМ

<p>Номер регистрации (свидетельства): 2019614760</p> <p>Дата регистрации: 11.04.2019</p> <p>Номер и дата поступления заявки: 2019613496 02.04.2019</p> <p>Дата публикации и номер бюллетеня: 11.04.2019 Бюл. № 4</p> <p>Контактные реквизиты: (8152) 403430, plyasunovala@mstu.edu.ru</p>	<p>Автор(ы): Ерещенко Виктор Валерьевич (RU), Яценко Виктория Владимировна (RU)</p> <p>Правообладатель(и): Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Мурманский государственный технический университет» (ФГБОУ ВО «МГТУ») (RU)</p>
---	---

Название программы для ЭВМ:  
Программа управления для платы управления включением и выключением холодильной машины

**Реферат:**  
Программа предназначена для управления платой включения и выключения холодильной машины. Используется в программно- аппаратном комплексе поиска оптимальных режимов холодной сушки гидробионтов. Функции программы: обеспечивает связь с управляющим ПК по протоколу ModbusRTU, выдает управляющие сигналы включение/выключение компрессора и вентилятора.

**Язык программирования:** C++  
**Объем программы для ЭВМ:** 7,85 Кб