

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Московский государственный университет пищевых производств»

На правах рукописи

Мокрушин Сергей Александрович

**РАЗРАБОТКА АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ
УПРАВЛЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМ ПРОЦЕССОМ
СТЕРИЛИЗАЦИИ КОНСЕРВОВ В ПРОМЫШЛЕННОМ
АВТОКЛАВЕ**

Специальность: 05.13.06 – Автоматизация и управление технологическими
процессами и производствами (пищевая промышленность)

ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание учёной степени кандидата технических наук

Научный руководитель:
доктор технических наук
Благовещенский И.Г.

Москва - 2019

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
ГЛАВА 1. СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ПРОИЗВОДСТВА КОНСЕРВОВ И ПРОБЛЕМЫ ЕГО АВТОМАТИЗАЦИИ	11
1.1 Современное состояние и перспективы развития автоматизации консервного производства в России	11
1.2 Основные сведения о технологическом процессе стерилизации консервов	14
1.3 Оборудование для стерилизации консервов	21
1.4 Вертикальный автоклав как объект автоматизации	26
1.5 Обзор существующих систем управления процессом стерилизации консервов	31
Выводы по первой главе.....	38
ГЛАВА 2. СОЗДАНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА СТЕРИЛИЗАЦИИ КОНСЕРВОВ В ПРОМЫШЛЕННОМ АВТОКЛАВЕ	39
2.1 Математическое описание изменения технологических параметров в промышленном автоклаве	39
2.1.1 Математическое описание процесса изменения температуры в автоклаве...	42
2.1.2 Математическое описание процесса изменения давления в автоклаве	47
2.2 Математическое моделирование процесса изменения температуры и давления в автоклаве	50
2.3 Идентификация и проверка адекватности математической модели.....	60
Выводы по второй главе	67
ГЛАВА 3. ВЫБОР СТРУКТУРЫ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМ ПРОЦЕССОМ СТЕРИЛИЗАЦИИ КОНСЕРВОВ В ПРОМЫШЛЕННОМ АВТОКЛАВЕ	69
3.1 Выбор структуры управляющих устройств	69
3.2 Оценка влияния свойств объекта на выбор закона регулирования	77
3.3 Выбор метода расчёта коэффициентов настройки регуляторов	84
3.4 Анализ качества процесса регулирования.....	92

Выводы по третьей главе.....	103
ГЛАВА 4. ПРОГРАММНО-АППАРАТНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССОМ СТЕРИЛИЗАЦИИ КОНСЕРВОВ.....	105
4.1 Описание структуры системы автоматического управления процессом стерилизации в автоклаве.....	105
4.2 Интеграция участка стерилизации консервов в общую информационную систему предприятия	112
4.3 Аппаратная реализация программно-аппаратного комплекса управления процессом стерилизации консервов.....	115
4.4 Программная реализация программно-аппаратного комплекса управления процессом стерилизации консервов.....	126
4.5 Техничко-экономическая эффективность внедрения на производстве программно-аппаратного комплекса.....	147
Выводы по четвёртой главе.....	150
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	153
СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ.....	156
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	157
ПРИЛОЖЕНИЕ А. Схемы моделирования с подставленными числовыми значениями.....	170
ПРИЛОЖЕНИЕ Б. Таблицы расчета относительной погрешности	171
ПРИЛОЖЕНИЕ В. Структурная схема системы автоматического управления с контролем показаний теплоносителя.....	173
ПРИЛОЖЕНИЕ Г. Акты о внедрении	174
ПРИЛОЖЕНИЕ Д. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ	176

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования. Консервы являются стратегическим продуктом питания, от их качества зависит продовольственная безопасность страны в чрезвычайных ситуациях. Одними из основных процессов обработки сырья в пищевой промышленности является термическая обработка продукта (стерилизация и пастеризация), которая достаточно энергоемка. Ассортимент консервной продукции в условиях рыночной конкуренции постоянно расширяется, а к качеству консервов предъявляются более высокие требования, которые могут удовлетворяться только за счет совершенствования технологии и оборудования. По этой причине на многих предприятиях предусмотрены мероприятия по выведению из эксплуатации старого неэффективного оборудования и внедрению нового, соответствующего современным требованиям по качеству и энергоэффективности, а также использованию инновационных технологий в производственном процессе.

Резкому повышению эффективности технологического процесса стерилизации консервов может способствовать внедрение автоматических систем управления технологическим процессом, которые позволят более точно регулировать и поддерживать параметры процесса. В силу этого, разработка и исследование систем автоматизации технологического процесса стерилизации консервов является актуальной научно технической задачей.

Адекватная математическая модель технологического процесса является одним из наиболее мощных инструментов создания эффективных систем автоматического управления. Следует отметить, что процесс стерилизации зависит от ряда факторов, учет влияния и взаимодействия которых, а также точность их отражения на поведении модели, является одной из главных задач предлагаемого исследования.

Таким образом, можно утверждать, что разработка эффективных алгоритмов и системы автоматического управления автоклавом на основе современных законов управления для ведения процесса стерилизации консервов,

является актуальной научной задачей, решение которой позволит существенно снизить расход энергоресурсов и процент брака продукции после стерилизационной обработки, что в конечном итоге отразится на себестоимости конечного продукта.

Степень разработанности темы исследования. Большой теоретический и практический вклад в развитие теории процесса стерилизации внесли отечественные ученые: М. С. Аминов, Б. Л. Флауменбаум, В. П. Бабарин, М. Э. Ахмедов и др. Исследованиями процессов тепло- и массопереноса при стерилизации консервов, а также вопросами автоматизации процесса стерилизации занимались ученые: А.П. Бабенков, П. В. Зеленков, Б. Е. Щёкин, М. П. Асмаев, Е. В. Выскубов, А. В. Власов, А. В. Кайченев и др. В настоящее время стерилизационные установки постоянно совершенствуются, разрабатываются новые конструкции, внедряются передовые способы стерилизации продуктов. Однако зачастую не исследуется эффективность применения различных методов автоматического управления процессом стерилизации, методы настройки промышленных регуляторов на заданный вид технологического процесса. Также до конца не исследованы способы точного и эффективного регулирования технологических параметров в установке для стерилизации консервов.

Цель исследования. Повышение эффективности установки и качества производимой продукции за счёт повышения точности поддержания заданных параметров технологического процесса и гибкости формирования режимов стерилизации консервов в промышленном автоклаве.

Задачи исследования.

1. Исследование современного состояния производства консервов, анализ проблем автоматизации стерилизационных установок, выявление недостатков современных отечественных систем автоматического управления технологическим процессом стерилизации консервов.

2. Разработка структуры и выбор комплекса технических средств для реализации системы автоматического управления технологическим процессом стерилизации консервов в промышленном автоклаве, с целью снижения доли

ручного труда, экономии энергоресурсов и повышения качества готовой продукции.

3. Разработка математической модели технологического процесса стерилизации консервов в промышленном автоклаве.

4. Разработка алгоритма и структуры системы управления технологическим процессом стерилизации консервов, опирающихся на теорию автоматического управления и учитывающих взаимное влияние управляющих координат.

5. Практическая реализация системы автоматического управления процессом стерилизации консервов в виде программно-аппаратного комплекса с организацией человеко-машинного интерфейса.

Объект исследования. Технологический процесс стерилизации консервов в промышленном автоклаве.

Предмет исследования. Модель технологического процесса стерилизации консервов в промышленном автоклаве, разработка и исследование на её основе системы автоматического управления данным процессом.

Методы исследования. При проведении исследований применялись методы экспериментальных исследований, методы теории автоматического управления, а также теория и пакеты программ математического моделирования.

Моделирование на ЭВМ проводилось с использованием программного средства MATLAB в приложении Simulink.

Научная новизна исследования.

1. Выявлены основные показатели качества, комплекс технических требований и ограничений, необходимые для рационального решения задач автоматического управления технологическим процессом стерилизации консервов в промышленном автоклаве.

2. Предложена математическая модель, наибольшим образом соответствующая физической природе протекающих в автоклаве теплообменных процессов, учитывающая не только тепловую ёмкость воды и продукта в автоклаве, но и тепловую ёмкость корпуса автоклава.

3. Математическая модель процесса стерилизации консервов в промышленном автоклаве, отличающаяся тем, что она организована по блочному принципу и включает в себя как математическое описание процесса изменения температуры, так и давления во внутреннем объеме автоклава, а также учитывает взаимную связь между этими параметрами.

4. Разработан алгоритм и структура системы автоматического управления технологическим процессом стерилизации консервов, реализующие современные законы автоматического управления и учитывающие взаимное влияние управляющих координат.

5. Поставлена и решена задача заданного управления многостадийным процессом стерилизации консервов в промышленном автоклаве при паровом нагреве в воде с противодавлением за счет создания перепрограммируемой системы автоматического управления.

Положения, выносимые на защиту.

1. Математическая модель технологического процесса стерилизации консервов в промышленном автоклаве, организованная по структурно-функциональному принципу с учётом взаимосвязанности параметров, наибольшим образом соответствующая физической природе протекающих в автоклаве тепло- и массообменных процессов.

2. Метод создания системы автоматического управления технологическим процессом стерилизации консервов в промышленном автоклаве с применением современных законов теории автоматического управления и имитационного моделирования.

3. Алгоритм автоматического управления технологическим процессом стерилизации консервов в промышленном автоклаве на базе законов автоматического управления, обеспечивающий снижение доли брака в готовой продукции и экономию энергоресурсов за счет точного регулирования технологических параметров и компенсации взаимного влияния контуров регулирования для всех технологических стадий процесса стерилизации.

4. Состав, структура и технические решения, принятые при реализации системы автоматического управления технологическим процессом стерилизации консервов в промышленном автоклаве в виде программно-аппаратного комплекса.

Степень достоверности. Достоверность и обоснованность представленных в диссертационной работе теоретических результатов и формулируемых на их основе выводов, научных положений, методики разработки и рекомендаций обеспечивается проработкой модели исследуемого технологического процесса, строгостью производимых математических выкладок, апробированных расчетных методик, базирующихся на аппарате теории автоматического управления, имеющего под собой достаточно жесткую математическую основу. Подтверждается их непротиворечивостью известным положениям в соответствующих предметных областях, а также достаточной сходимостью экспериментально полученных результатов на реальном объекте управления – промышленном автоклаве для стерилизации консервов.

Справедливость выводов относительно предложенной системы автоматического управления и её алгоритмов подтверждена математическим моделированием с применением современных вычислительных методов, численным определением параметров модели объекта и идентификацией при помощи экспериментальных данных промышленных процессов стерилизации консервов, а также воспроизводимостью опытов.

Корректное применение теории автоматического управления и методов аппроксимации и идентификации объекта управления показало согласованность экспериментальных данных и результатов теоретического исследования.

Практическая значимость исследования.

1. Разработана и реализована на ЭВМ математическая модель технологического процесса стерилизации консервов, которая может использоваться в научно-исследовательских работах.

2. Разработана структура системы автоматического управления технологическим процессом стерилизации консервов, которая является

универсальной и может эффективно использоваться при проектировании систем управления аппаратов, использующих аналогичные технологии.

3. Предложенный алгоритм автоматического управления может быть использован для усовершенствования существующих и создания новых систем автоматического управления стерилизационными установками, реализующими аналогичные технологии.

4. Предложенный алгоритм и система автоматического управления позволяют добиться более глубокой автоматизации, в том числе подготовительных операций, что, в свою очередь, существенно сокращает ручной труд в производственном цикле стерилизации консервов.

5. Практическая реализация системы автоматического управления процессом стерилизации консервов в промышленном автоклаве выполнена в виде программно-аппаратного комплекса с автоматизированным рабочим местом оператора и внедрена в технологический процесс на ООО Консервный завод «Росинка» (г. Яранск, Кировская обл.).

Реализация результатов. Система автоматического управления процессом стерилизации консервов, оформленная в виде промышленного образца, прошла успешные производственные испытания на консервном заводе «Росинка» (г. Яранск, Кировская область) и принята в производственную эксплуатацию, что подтверждается соответствующим актом о внедрении.

Теоретическая и практическая часть исследования выполнены в рамках научно-исследовательской работы по гранту федерального государственного бюджетного учреждения «Фонд содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере» на тему «Разработка программно-аппаратного комплекса управления процессом стерилизации пищевых продуктов в автоклавах» (договор №4612Г У2/2014 от 23.12.2014, конкурс УМНИК 2-14-12).

Большинство теоретических положений и практических решений диссертации использовано в учебном процессе при подготовке бакалавров по направлениям 13.03.02 «Электротехника и электроэнергетика» и 15.03.06

«Мехатроника и робототехника» на кафедре электропривода и автоматизации промышленных установок Вятского государственного университета (ВятГУ), что подтверждается актом о внедрении в учебный процесс.

Апробация работы. Основные результаты диссертации докладывались на VII Международной (VIII Всероссийской) научно-технической конференции по автоматизированному электроприводу в 2012 г., ежегодных всероссийских научно-практических конференциях «Общество, наука, инновации» в 2012, 2013, 2014, 2015, 2016, 2017 гг.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 24 работы (из них 6 статей, 18 тезисы докладов), в том числе 4 работы в изданиях, рекомендованных ВАК РФ; получено 1 свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав, выводов, списка сокращений и условных обозначений, списка литературы (100 наименований) и 5 приложений. Работа изложена на 176 страницах, содержит 56 рисунков и 29 таблиц. В 5 приложениях представлена схема моделирования с подставленными числовыми значениями, таблицы расчёта относительной погрешности, структурная схема системы управления с контролем показаний теплоносителя, акты внедрения и свидетельство о регистрации программы для ЭВМ.

ГЛАВА 1. СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ПРОИЗВОДСТВА КОНСЕРВОВ И ПРОБЛЕМЫ ЕГО АВТОМАТИЗАЦИИ

1.1 Современное состояние и перспективы развития автоматизации консервного производства в России

Пищевая промышленность, и в частности консервная промышленность, является одной из крупнейших отраслей народного хозяйства, входящих в Российский агропромышленный комплекс. Консервы являются стратегическим продуктом питания в чрезвычайных ситуациях, а от их качества и количества зависит продовольственная безопасность страны.

Консервная промышленность России развивается путем строительства новых перерабатывающих предприятий и модернизации существующих производств. В настоящее время в консервной промышленности широко применяются современные технологии и оборудование, автоматизируются отдельные операции и на их основе конструируются новые аппараты, многие технологические процессы становятся непрерывными, создаются поточные производственные линии. Всё это ведёт к росту объёма производства, но при этом создаётся необходимость в комплексной автоматизации – создании автоматизированных линий, цехов, а в дальнейшем и заводов.

Одним из самых ответственных технологических процессов в производстве консервов, от которого во многом зависит длительность хранения и качество выпускаемой продукции, является процесс стерилизации [89]. Однако, как следует из анализа научно-технической и учебно-методической литературы, до настоящего времени глубоких исследований в области автоматизации процесса стерилизации, особенно по вопросам построения систем автоматического управления, проводилось недостаточно для полного решения проблемы. А между тем технологический процесс стерилизации консервов является особо сложным с точки зрения его автоматизации.

В процессе стерилизации продукты подвергаются воздействию высокой температуры, вследствие чего микроорганизмы, находящиеся в обрабатываемом продукте, гибнут. В результате обеспечивается длительная сохранность консервированного продукта. Управление процессом стерилизации основано на законах теплового воздействия на микробные клетки внутри продукта, поэтому качество готовой продукции напрямую зависит от качества процесса стерилизации, являющегося наиболее сложным и ответственным этапом в технологической цепочке консервирования.

Кроме того, для управления процессом стерилизации необходимо детально изучить особенности изменения давления в таре при тепловой обработке с целью четкого выполнения требований технологии и исключения брака продукции.

Для консервной промышленности характерны непрерывные, дискретные и непрерывно-дискретные производства, поэтому требования к видам и методам автоматизации консервных производств весьма разнообразны. При создании систем управления для консервной промышленности необходимо использовать весь арсенал современной теории и практики автоматического управления.

К сожалению, в нашей стране на ряде предприятий консервной промышленности процессы стерилизации автоматизированы на морально и физически устаревших средствах автоматики. Тем не менее, в настоящее время появились датчики и приборы нового поколения для контроля качества процессов происходящих в сырье в процессе консервирования. Однако практика показывает, что многие из предлагаемых приборов не пригодны для консервной промышленности, либо требуют дополнительных исследований с целью оценки эффективности применения в условиях консервного производства.

Благодаря автоматизации производственных процессов можно добиться не только увеличения количества выпускаемой продукции, но и улучшения её качества, освободить обслуживающий персонал от вредных и тяжёлых условий труда, повысить к.п.д. машин и аппаратов, снизить удельный расход пара, воды, воздуха и электроэнергии, улучшить санитарное состояние и поднять общую культуру производства.

Автоматизация технологического процесса может быть осуществлена различными способами, с использованием разнообразных средств автоматики, отличающихся по свойствам, назначению, принципу действия, конструктивному оформлению, точности, надёжности и другим показателям. К автоматическим устройствам относят устройства автоматического контроля, дистанционного и автоматического управления, сигнализации и автоматической защиты, блокировки и автоматического регулирования, а также диспетчеризации производства. Система автоматического управления сможет поддерживать заданную величину параметра только при условии правильного выбора регулятора и места установки элементов системы [79].

Чтобы правильно выбрать регулятор и его параметры настройки, необходимо знать основные свойства объекта регулирования. Нужно иметь чёткое представление о статических и динамических характеристиках объекта автоматизации, которые позволяют судить о том, как изменяется регулируемый параметр по времени и какие факторы влияют на его изменение.

Результаты автоматизации производственных процессов будут зависеть от того, насколько в процессе эксплуатации применяемая система автоматического управления (САУ) удовлетворяет поставленным перед ней требованиям [51], к которым относятся:

- качество регулирования;
- возможность получения заданного режима, обеспечивающего максимальную производительность установки;
- экономическая эффективность внедрения САУ;
- надёжность и безопасность работы САУ;
- простота в обслуживании и возможность быстрой перенастройки системы управления на новый режим работы;
- правильная эксплуатация элементов автоматики.

1.2 Основные сведения о технологическом процессе стерилизации консервов

Процессом стерилизации называют тепловую обработку продукта, целью которого является подавление жизнедеятельности микроорганизмов при температуре 100°C и выше. Тепловая стерилизация продукта является основным процессом консервного производства, обеспечивающим сохранность консервов в течение длительного времени. При стерилизации микроорганизмы в продукте уничтожаются почти полностью, при этом создаются условия неблагоприятные для жизнедеятельности оставшихся микроорганизмов. Абсолютно стерилизованные консервы могут быть получены при высоких температурах стерилизации (до 180°C) или в течение длительного времени стерилизации, но обрабатываемый продукт при этом претерпевает глубокие изменения, вследствие чего страдает его пищевая ценность. При стерилизации, кроме уничтожения микроорганизмов, необходимо стремиться, чтобы сохранились вкусовые качества продуктов и содержание в них витаминов. Сам метод консервирования пищевых продуктов был открыт французом Н. Аппером свыше 150 лет назад и до сих пор является основным и наиболее надёжным способом сохранения пищевых продуктов [55, 90].

При стерилизации консервов основное значение имеют два фактора - температура и продолжительность её воздействия. Чем выше температура стерилизации, тем меньше требуется времени для инактивирования микробов, и наоборот.

Продолжительность воздействия температуры, необходимая для уничтожения микробов при данной температуре стерилизации, называется «смертельным временем»; оно зависит от температуры стерилизации, химических и физических свойств продукта, материала и размеров тары, а так же вида и количества микроорганизмов в продукте, подвергаемом стерилизации [3, 91].

Как правило, на производстве нет устройства, позволяющего измерять температуру продукта внутри банки. Поэтому принято режимом стерилизации управлять по температуре греющей банку среды (теплоносителя), в роли которой

выступает вода, пар или воздух. Условную запись технологического процесса стерилизации консервов в автоклаве, в котором происходит процесс стерилизации, называют формулой стерилизации. Для автоклавов периодического действия, которые более распространены на производстве, каждый цикл стерилизации начинается с нагрева воды в автоклаве до температуры стерилизации, далее идёт сама стерилизация продукта и заканчивается всё охлаждением до температуры (30 – 40 °С), позволяющей сбросить давление и провести разгрузку автоклава. Условная запись формулы для стерилизации в воде с противодавлением имеет вид [5]:

$$\frac{A-B-C}{\Theta} P. \quad (1.1)$$

Формула для стерилизации в паровоздушной среде с противодавлением:

$$\frac{a-A-B-C}{\Theta} P, \quad (1.2)$$

где a – время продувки автоклава, когда воздух из автоклава вытесняется паром, мин; A – период нагревания, время нагревания теплоносителя в автоклаве от начальной температуры до заданной, мин; B – стерилизация, время выдержки при заданной температуре, мин; C – период охлаждения, время снижения температуры и давления до уровня, позволяющего производить разгрузку автоклава, мин; Θ – температура греющей среды при стерилизации, °С; P – противодавление, создаваемое в автоклаве для компенсации внутреннего давления, возникающего в банках при стерилизации, кПа.

Величина требуемого противодавления определяется суммой слагаемых [24]:

$$P = P_1 + P_2 + P_3 + P_4, \quad (1.3)$$

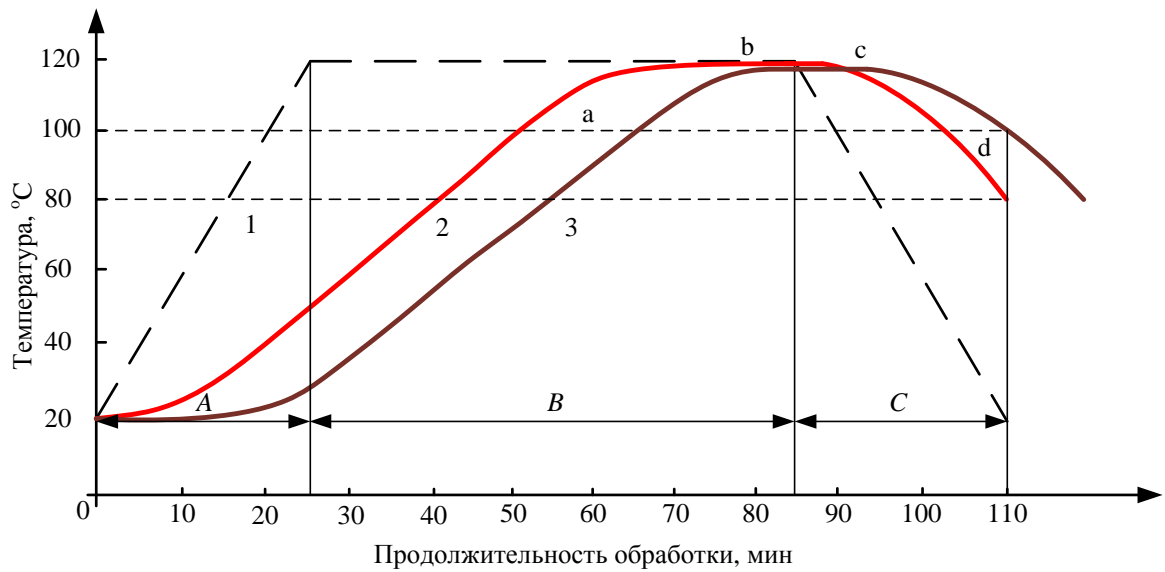
где P_1 – давление паров воды, кПа; P_2 – давление воздуха, кПа; P_3 – давление газов, кПа; P_4 – давление продукта, кПа.

Противодавлением называют сумму давлений греющего пара или воды и избыточного давления, создаваемого при помощи сжатого воздуха, подаваемого в автоклав. Противодавление внутри автоклава создают, чтобы избежать возникновения деформаций банок или срыва крышек со стеклянных банок [76].

Изменение температуры во время технологического процесса показано кривыми на рисунке 1.1 [28]. Повышение по времени температуры в банке отстает от повышения температуры среды в автоклаве, а при неверно выбранных режимах может и не достигнуть заданного значения. Величина отставания во многом зависит от скорости прогрева продукта. Как правило, быстрее прогревается жидкая часть продукта, в которой теплопередача происходит путем конвекции. Для твердой части отставание более значительно, так как теплопередача здесь определяется в основном теплопроводностью [96].

При стерилизации температура продукта в консервах постоянно изменяется, причем неравномерно по объему банки. В периферийной части нагрев происходит быстрее, а в центре банки медленнее. Поскольку температура в холодной точке является функцией температуры греющей среды, то график прогрева «холодной» (критической) точки тесно связан с графиком изменения температуры греющей среды в автоклаве [35, 93, 95].

Автоклавы после включения подачи пара не сразу достигают заданной рабочей температуры. Для этого требуется некоторое время A . При оценке воздействия периода подготовки емкости до конечной рабочей температуры было установлено, что 42% общего времени можно рассматривать как период выдержки при рабочей температуре. В России значение параметра A принимают как заданную величину. При стерилизации жестяных банок емкостью до 1,0 кг A составляет 20 мин, для банок большей емкости – 30 мин. Для стеклянных банок емкостью 0,5 кг A имеет значение 25 мин, для банок емкостью 1 кг – 30 мин [28].



1 – изменение температуры греющей среды (теплоносителя); 2 – изменение температуры жидкой части продукта в центре банки; 3 – изменение температуры плотной части продукта в центре банки; A – время нагревания продукта паром; B – время стерилизации продукта; C – время охлаждения продукта холодной водой; a – начало стерилизации; (b – c) – выдержка продукта при заданной температуре; d – охлаждение продукта.

Рисунок 1.1 - Графики изменения температуры в процессе стерилизации

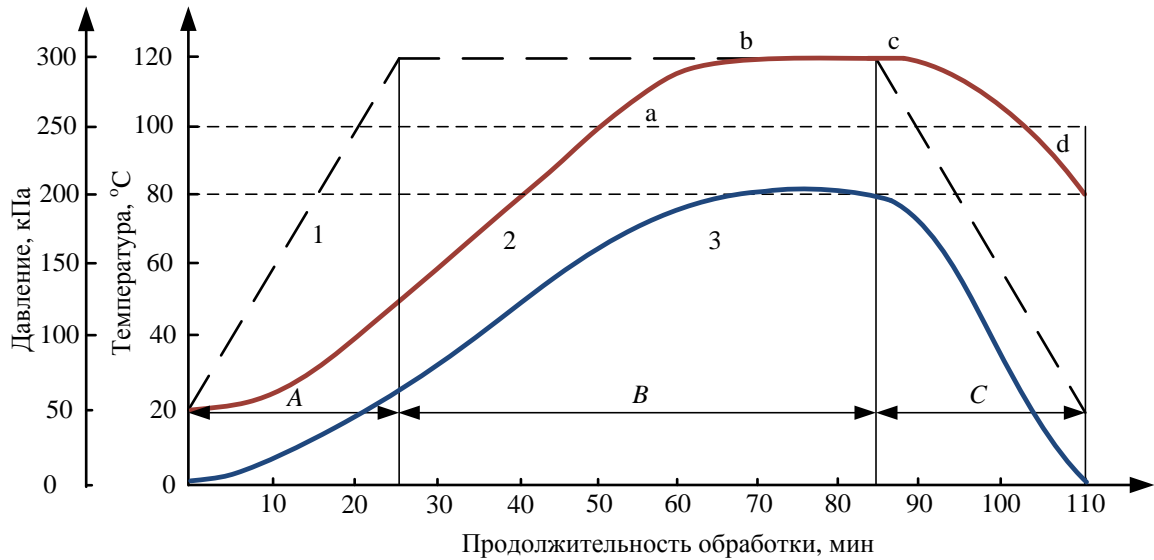
Момент начала охлаждения продукта отстаёт от начала охлаждения греющей среды в автоклаве. При этом параметр C определяется необходимостью выравнивания давления в банке с атмосферным давлением, поскольку к моменту выгрузки из автоклава давление в банке не должно превышать предельно допустимого, иначе возможна необратимая деформация жестяной банки или срыв крышки со стеклянной тары. В некоторых случаях, когда для продукта недостаточно времени охлаждения C, применяют дополнительное охлаждение холодной водой при атмосферном давлении.

Давление внутри банки во время процесса стерилизации складывается из парциальных давлений водяных паров, воздуха и газов, выделившихся из продукта и заполняющих свободное пространство банки, а также давления, вызванного расширением продукта в банке - формула (1.3). Величина объема свободного пространства зависит от коэффициента заполнения банки, степени расширения продукта в результате нагрева и степени увеличения объема банки вследствие теплового расширения материала, из которого она изготовлена.

Коэффициент заполнения банки устанавливается инструкциями, регламентирующими массу продукта в банке. Для разных продуктов он разный. В стеклянных банках степень увеличения объема банки всегда меньше степени расширения продукта, вследствие чего коэффициент их заполнения должен быть меньше, чем для жестяных банок [28].

Степень расширения продукта, паров и газов внутри банки всегда превышает степень расширения самой банки, поэтому при стерилизации давление в банке превышает давление в автоклаве, создаваемое паром. Чем выше температура стерилизации, тем разница между степенью расширения банки и её внутренним давлением больше. В результате возникает деформация банок. Поэтому допустимая разница между давлением в автоклаве и внутри банки не должна превышать заданной критической величины.

После стадии стерилизации, поскольку внутри банок температура продукта по-прежнему остается высокой, нельзя резко снижать давление в автоклаве до атмосферного, так как это приведёт к увеличению разницы между давлением в банке и в автоклаве (рисунок 1.2). Давление в автоклаве с атмосферным следует выравнивать постепенно с заданной интенсивностью, не допуская сокращения установленного промежутка времени. Снижение давления занимает тем больше времени, чем выше была температура при стерилизации и чем больше размеры банок. Особенно это важно при использовании стеклянной тары [28].



1 – график изменения температуры греющей среды; 2 – график изменения температуры продукта; 3 – график изменения давления внутри банки; *A* – время нагревания теплоносителя и продукта паром в автоклаве; *B* – время стерилизации продукта; *C* – время охлаждения продукта холодной водой; *a* – начало стерилизации; (*b* – *c*) – выдержка при заданной температуре; *d* – охлаждение.

Рисунок 1.2 - Графики изменения температуры и давления в процессе стерилизации

Во избежание излишних затрат времени на выравнивание давления эту операцию осуществляют с использованием холодной воды, подавая ее в автоклав под тем же давлением, которое установилось к концу стерилизации, и постепенно снижая его до атмосферного. Продолжительность выравнивания давления уменьшается вследствие более быстрого охлаждения консервов.

Продолжительность снижения температуры и давления, т. е. параметр *C* в выражениях (1.1) и (1.2), зависит от типа и размеров банок, а также от температуры стерилизации и регламентируется инструкциями.

Значения параметров *A* и *C* являются заданными величинами, поэтому создание формулы стерилизации сводится к определению величины *B*, как

функции изменяющейся температуры внутри банки в течение времени, обеспечивающего гибель микроорганизмов. Расчет производят по методу Болла или по модульному методу [88].

Глубокие исследования в области определения фактического стерилизующего эффекта провёл Б. Л. Флауменбаум. Он предложил упрощенный метод, в котором стерилизующий эффект (F-показатель) приводится к тому, который мог быть получен в предположении, что выдержку производят при эталонной температуре 121,1 °С, которая мгновенно достигается и также снижается [81].

В настоящее время о термоустойчивости микроорганизмов при высоких температурах судят по соответствующим кинетическим константам. Полученные константы дают возможность приближёнными методами учесть стерилизующий эффект (F-эффект) отдельных отрезков времени тепловой обработки и определить общую летальность процесса стерилизации. Найденное значение сравнивают с нормой летальности и, в случае необходимости, корректируют данный режим стерилизации таким образом, чтобы фактическая летальность его равнялась или была больше нормативного значения [82, 98, 100].

Формулы стерилизации для каждого вида консервов утверждаются соответствующим ГОСТом. При необходимости разработки новых режимов стерилизации консервов или пересмотра существующих проводятся исследования с участием заказчика (предприятия-изготовителя) и разработчика. Разработчиками режимов, как правило, являются лаборатории, обеспеченные квалифицированными кадрами, соответствующей аппаратурой, приборами, материалами и реактивами. Чаще всего разработкой режимов производства консервов занимаются научно-исследовательские институты пищевой промышленности [11].

В консервной промышленности основным способом для предохранения пищевых продуктов от порчи является тепловая стерилизация, при которой продукт в герметически укупоренной таре подвергают нагреванию до уничтожения микроорганизмов. В последнее время предложены новые методы

обработки продуктов, также основанные на подавлении жизнедеятельности микроорганизмов [9,94] такими как: воздействие токами высокой частоты, воздействие инфракрасными и ионизирующими излучениями, применение ультразвуковых колебаний, применение антибиотиков и ферментов, использование химических консервантов и антисептиков. Однако тепловая стерилизация консервов в герметичной таре по-прежнему останется основным способом промышленного производства консервов [62].

1.3 Оборудование для стерилизации консервов

Большая часть машин и аппаратов в пищевой промышленности представлена как преобразователи пищевых сред. Большую часть из этого оборудования составляет оборудование для ведения теплообменных процессов. Как отмечалось ранее, для обеспечения длительного хранения консервов необходимо осуществить их стерилизацию, в результате чего происходит инактивация микроорганизмов внутри банок с продуктом. Тепловую обработку продукции при температуре до 100°C называют пастеризацией, а при температуре выше 100°C называется стерилизацией. Стерилизация, в отличие от пастеризации, проводится при избыточном давлении внутри автоклава.

Стерилизаторы и пастеризаторы относятся к аппаратам для тепловой обработки пищевых продуктов с последующей выдержкой их при определенной температуре. Данное оборудование осуществляет тепло-массообменные процессы, которые вызывают сложные физико-химические и структурно-механические изменения, связанные с поверхностным или объемным проникновением теплоты в продукт, для гибели микроорганизмов с предотвращением их развития в продукте. Однако этот процесс также приводит к изменению агрегатного и структурного состояний продукта, размягчению растительных тканей, что способствует их разрушению и экстрагированию необходимых веществ, что необходимо учитывать при технологическом процессе.

Существуют непрерывно работающие и периодически действующие аппараты для стерилизации пищевых продуктов (рисунок 1.3) [12].

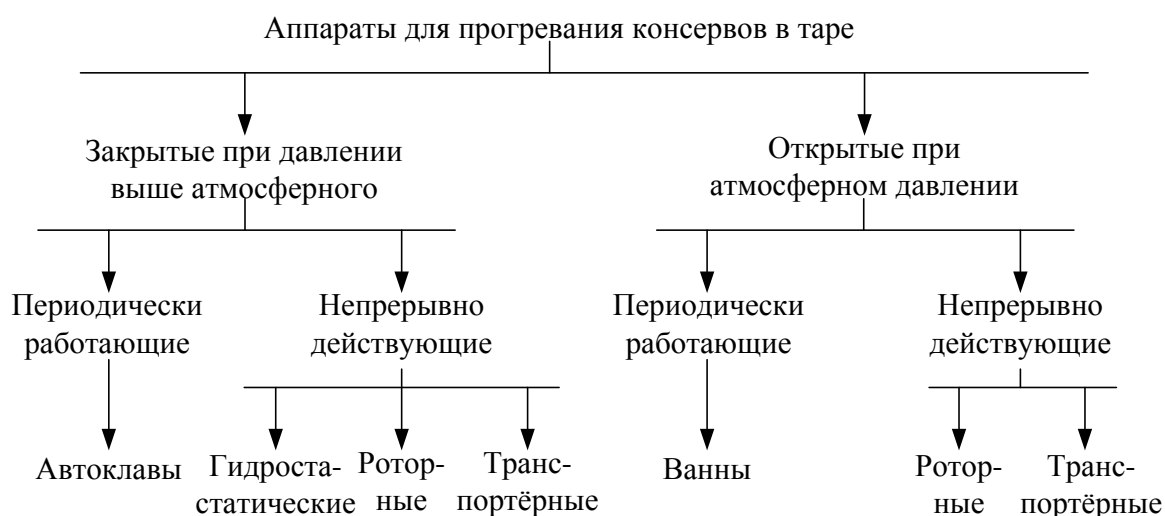


Рисунок 1.3 - Классификация оборудования для пастеризации и стерилизации консервов

Стоит отметить, что аппараты открытого типа в промышленности применяются редко. Они используются для пастеризации соков в стеклянных бутылках с корончатыми крышками и при консервировании томатных продуктов в жестяной таре.

Для высокопроизводительных производств, с производством больших партий однотипной продукции, используются установки непрерывного действия, которые разделяются на три группы: роторные установки, установки с гидростатическим противодействием и установки с пластинчатым транспортёром.

В роторных стерилизаторах непрерывного действия [3] при вращении ротора банки вращаются вместе с ним, направляемые спиралью, поступательно перемешаются к месту выгрузки. Кроме того, катясь по нижней части корпуса, банки силой трения вовлекаются во вращательное движение вокруг своей оси. Таким образом, стерилизуемая банка участвует в трех видах движения, что ускоряет ее прогрев. Особенностью такой стерилизации консервов является отсутствие стадии подъема температуры в стерилизаторе, так как температура в

нем постоянная для данного продукта и принятого режима стерилизации. Поступающая в стерилизатор банка сразу попадает под воздействие максимального температурного перепада. Перемешивание нагреваемого продукта благодаря подвижности банки интенсифицирует процесс нагрева и способствует уменьшению продолжительности стерилизации.

Преимущества по сравнению с автоклавами периодического действия [5]:

- уменьшается продолжительность стерилизации;
- более простой контроль за режимом стерилизации;
- улучшается вкус и внешний вид некоторых видов консервов; так,

например, в паштете и других похожих продуктах благодаря перемешиванию во время стерилизации более равномерно распределен жир и жидкая фаза.

К недостаткам роторных стерилизаторов следует отнести:

- необходимость оснащать агрегаты сложными механизмами, при помощи которых осуществляется передача банок из среды с одним давлением в среду с другим давлением;
- в результате износа трущихся деталей происходит утечка пара;
- возможность стерилизовать банки только одного типа и размера.

Последнего недостатка лишены гидростатические стерилизаторы непрерывного действия [3]. В них закатанные банки можно вводить через водяной затвор из среды с атмосферным давлением, в среду с давлением выше атмосферного и наоборот. Подача банок при этом может производиться без шлюзовых затворов, так как гидростатическим затвором является столб воды. Недостатком всех гидростатических стерилизаторов непрерывного действия является возможность стерилизовать банки только одного размера и большие габариты (высота до 40м) при расчёте агрегата на создание противодействия, необходимого для стерилизации банок в стеклянной таре.

Уменьшить высоту гидростатического стерилизатора с 35-40 до 5-7 метров можно благодаря применению схемы ступенчатого повышения давления от атмосферного до того значения, которое необходимо при стерилизации консервов. При этом весь корпус агрегата разделяется на ряд отсеков, давление в

которых отличается на одну и ту же величину. Так же можно выполнять удержание крышки на горлышке стерилизуемой стеклянной банки с помощью специальных термомеханических или механических прижимов. Однако всё это приводит к усложнению конструкции стерилизатора и к дополнительным проблемам при обслуживании и эксплуатации.

В стерилизаторах с пластинчатым транспортером [3] внутри камеры при помощи специальных направляющих банки в вертикальном положении медленно продвигаются через камеру, заполненную паром. Охлаждение банок в охладителях производится под душем вначале тёплой водой, затем смесью тёплой и холодной воды и, наконец, холодной водой. Данный вид стерилизаторов удобен для стерилизации продукции, где нежелательна принудительная циркуляция продукта вследствие вращения банок. Однако наличие дефектов (заусениц, подрезов) даже незначительного количества банок приводит к тому, что при многократных переходах в стерилизаторе они опрокидываются, а непрочные банки разрываются и заклинивают аппарат. При этом на устранение неисправности тратится значительное время (до 4 часов), что приводит к нарушению режима стерилизации и браку продукции.

Несмотря на обозначенные преимущества перед стерилизаторами периодического действия, аппараты непрерывного действия используются значительно реже [28]. Причиной меньшего использования непрерывно действующих стерилизаторов является то, что в них трудно организовать стерилизацию продукта в стеклянной таре, так как она производится в воде, нагреваемой паром, при наличии противодействия, требуемое значение которого сложно создать в аппаратах непрерывного действия. Кроме того, в стерилизаторах непрерывного действия, стерилизацию в стеклянной таре опасно проводить, так как разбитая банка может заклинить вращающиеся механизмы агрегата и привести к бою последующих банок.

На консервных заводах в основном используются автоклавы периодического действия, которые работают с противодействием, поскольку такая технология позволяет стерилизовать продукт, упакованный в банки разных

типов. В свою очередь аппараты периодического принципа действия по конструкции разделяют на горизонтальные и вертикальные.

Корпус вертикального автоклава имеет цилиндрическую форму и вертикально установлен в углубление пола. Для загрузки в автоклав корзин с банками используется монорельс с подъёмным механизмом.

Корпус горизонтального автоклава также имеет цилиндрическую форму, но на пол устанавливается в горизонтальном положении на лапы. Тележки с банками в горизонтальный автоклав по рельсам закатываются с одной стороны, а после процесса термической обработки продукта выкатываются с другой. Для ускорения процесса прогрева продукта в горизонтальных автоклавах иногда применяют вращение корзин, что обеспечивает более равномерное проникновение теплоты к центру банок.

Недостатком горизонтальных автоклавов является то, что они занимают большую площадь помещения и в них трудно проводить стерилизацию консервов в воде. Так же степень использования объёма горизонтального автоклава меньше, чем у вертикального автоклава.

Недостатки периодически действующих автоклавов:

- сложность управления процессом без его автоматизации;
- трудоёмкость загрузки и разгрузки аппарата;
- трудоёмкость обслуживания;
- стадийность работы;
- продолжительность цикла стерилизации;
- при низкой автоматизации высокий процент брака продукции.

Кроме обычной стерилизации применяют асептическое консервирование [98]. Для этого применяются инъекционные стерилизаторы, в которых продукт, протекая в трубчатых и пластинчатых стерилизаторах, подвергается кратковременной стерилизации при высоких (до 140 °С) температурах. Затем он быстро охлаждается и фасуется в асептических условиях. Данный способ имеет следующие преимущества:

- достигается почти полное сохранение органолептических качеств продукта;
- продолжительность процесса стерилизации сокращается;
- режим стерилизации остаётся постоянным независимо от вида тары;
- сокращается расход пара, воды, электроэнергии и производственных площадей вследствие непрерывности и кратковременности обработки.

Однако данный вид стерилизации может применяться только для пюреобразных и жидких продуктов.

Таким образом, наиболее подходящим агрегатом для стерилизации на небольшом предприятии большой номенклатуры продукции является вертикальный автоклав периодического действия [56].

Большинство недостатков, присущих аппаратам периодического действия, может быть компенсировано средствами механизации и автоматизации. Автоматизация того или иного вида стерилизаторов может быть осуществлена различными способами путём использования разнообразных средств автоматики, отличающихся по свойствам, назначению, принципу действия, конструктивному оформлению, точности, надёжности и другим показателям. Автоматизация же автоклавов периодического действия, как следует из вышесказанного, является наиболее сложной задачей, но при этом крайне востребованной в настоящее время.

1.4 Вертикальный автоклав как объект автоматизации

Вертикальные автоклавы получили широкое распространение на консервных заводах в нашей стране. Наиболее широко применяются модели вертикальных автоклавов с неподвижными корзинами марки АВ-2, АВ-4, Б6-КАВ-2, Б6-КАВ-4, конструкции которых во многом идентичны.

Автоклавы Б6-КАВ-2 и Б6-КАВ-4 используются для стерилизации широкой номенклатуры консервов при температуре свыше 100°C. В таблице 1.1 приведены основные технические характеристики данных автоклавов [40].

Таблица 1.1 – Технические характеристики автоклавов Б6-КАВ

Параметры автоклава	Числовые значения	
	Б6-КАВ-2	Б6-КАВ-4
Размеры аппарата, мм:		
длина	2200	2200
ширина	1350	1350
высота	2750	4200
Диаметр внутренней поверхности аппарата, мм	1000	1000
Объём аппарата, л	1570	2750
Масса аппарата, кг	2370	3534
Допустимое рабочее давление в аппарате, МПа	0,35	0,35
Допустимое число корзин с банками, шт.	2	4

Автоклав Б6-КАВ-2 (рисунок 1.4) [40] состоит из корпуса 3, крышки 4 и корзин 10. Корпус автоклава состоит из сваренных цилиндров толщиной 6 мм. Днище у автоклава толщиной 8 мм. В приваренную к цилиндрическому корпусу автоклава камеру (термокарман) устанавливаются измерительные приборы системы управления: датчик измерения давления 8 и температуры 7. Конструкция термокармана выполнена таким образом, что в него из разных мест автоклава обеспечивается постоянный приток теплоносителя и, следовательно, в нём измеряется средняя температура теплоносителя по автоклаву [99]. Снизу корпуса автоклава расположен паровой барботер 11 и патрубок слива. При закрытии автоклава фланцы корпуса и крышки прижимаются друг к другу при помощи поясного зажима 2, состоящего из секторных захватов и рычажной системы для разведения и стягивания зажима. Для выпуска излишнего давления на крышке автоклава установлен предохранительный клапан 5 и вентиль запорный угловой 6, предназначенный для ручного сброса остаточного давления в конце цикла стерилизации. Для исключения недопустимого открытия крышки автоклава под давлением в нём установлено механическое предохранительное устройство. Для облегчения открывания и закрывания крышки автоклава имеется уравновешивающее устройство 1.

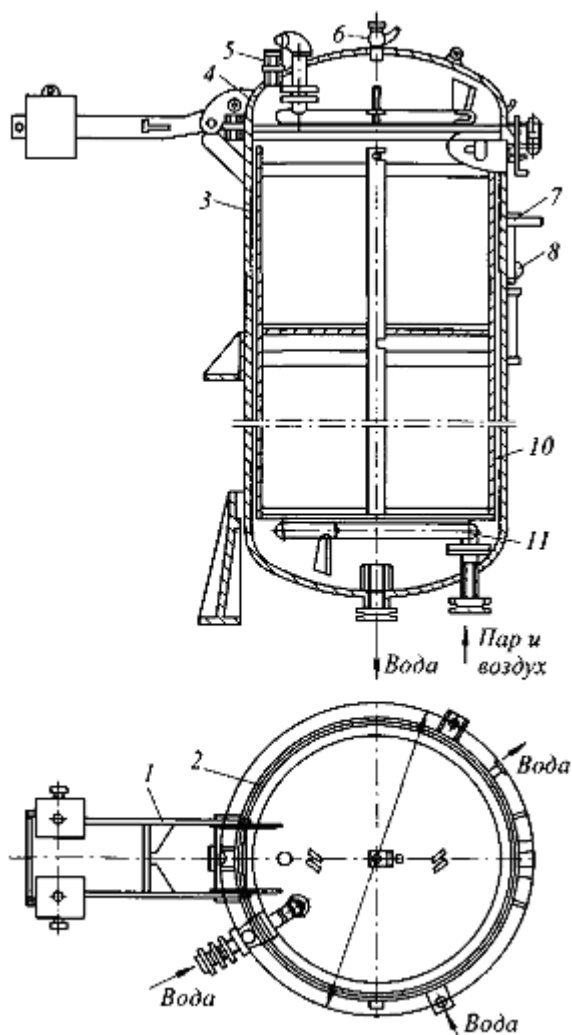


Рисунок 1.4 – Автоклав марки Б6-КАВ-В2

Автоклавные корзины наполняются банками и устанавливаются в наполненный водой автоклав одна на другую. Крышка закрывается. Автоклав заполняется водой до верхнего уровня и через барботер подается пар для нагрева. Компрессором создается и поддерживается постоянное давление в автоклаве. По истечении времени стерилизации, горячая вода и пар постепенно вытесняются из аппарата поступающей сверху холодной водой. После охлаждения продукт в корзинах при помощи электротельфера выгружаются из автоклава. Корзины, захваченные крюком за коромысло, перемещаются электротельфером по подвесному пути.

Стерилизацию можно производить [68]:

- в паровой среде без создания противодействия;
- в паровой среде с воздушным противодействием;
- в воде, подогреваемой паром, с противодействием, создаваемым воздухом.

Стерилизация в паровой среде без противодействия применяется редко (чаще в ручном режиме) и только для консервов в жестяной таре. При такой стерилизации процесс начинается с загрузки сеток с консервами и герметичного закрытия крышки автоклава. Открывается продувочный клапан для подачи в автоклав греющего пара, с целью вытеснения из автоклава воздуха через открытый продувочный клапан. Продувочный клапан закрывают после того, как воздух вытеснен и автоклав заполнен паром. С этого момента по заданной формуле начинается сам процесс стерилизации. Температура в автоклаве поддерживается клапанами подачи и спуска пара (верхнего слива). Излишнее давление при необходимости сбрасывается клапаном верхнего слива. Охлаждение продукта производится из трубопровода, расположенного в верхней части автоклава, подачей охлаждающей воды. Вода стремится вниз автоклава и равномерно охлаждает все банки, одновременно вытесняя из автоклава пар.

Чтобы не было боя банок, в некоторых конструкциях автоклавов холодную воду подают сверху через барботёр в крышке аппарата так, чтобы она не попадала непосредственно на банки.

Стерилизация в паровой среде с воздушным противодействием также применяется в основном для консервов в жестяной таре. При такой стерилизации процесс начинается с загрузки сеток с банками в автоклав и герметичного закрытия крышки. После этого одновременно открывают паровой и продувочный клапан. Начинается время продувки (параметр a в формуле 1.2), по истечении которого начинается непосредственно процесс стерилизации по заданной формуле стерилизации. В этом случае внутри автоклава дополнительно сжатым воздухом поддерживается давление, который подаётся компрессором через ресивер. Давление воздуха в ресивере выше давления в автоклаве. Регулировку давления в автоклаве, согласно формуле стерилизации, обеспечивают

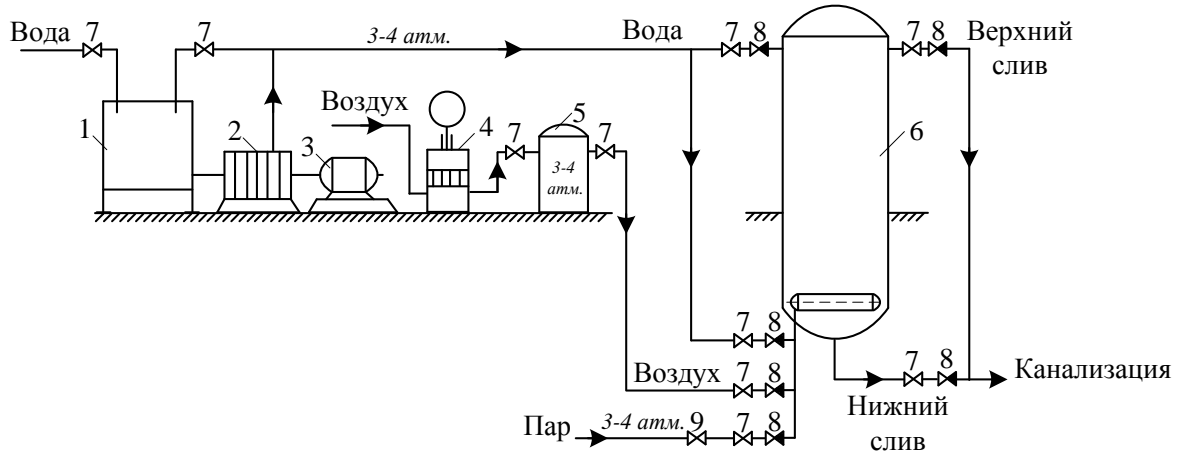
регулирующие воздушные клапаны на впускных и выпускных трубопроводах. Охлаждение продукта производится, как в первом случае, подачей сверху охлаждающей воды. Во время охлаждения происходит конденсация пара и резкое снижение давления. Для создания необходимого противодействия в автоклав подают сжатый воздух и тем самым постепенно снижают давление согласно формуле стерилизации.

Стерилизация консервов в воде, подогреваемой паром, с противодействием, создаваемым воздухом, применяется для консервов как в жестяной, так и в стеклянной таре. При такой стерилизации процесс начинается с загрузки сеток с банками в автоклав с тёплой водой (температура воды выше температуры продукта на 10-15 °С). Уровень воды должен быть выше верхнего ряда консервов. Затем крышку автоклава закрывают, и пускается пар. Температура и давление регулируются согласно формуле стерилизации (1.1). Давление в автоклаве поддерживается подачей воздуха под давлением. В отличие от первых двух способов стерилизации воздух из автоклава перед стерилизацией не удаляется и собирается под крышкой автоклава, образуя воздушную подушку. Подушка способствует сглаживанию резких перепадов давления внутри автоклава в процессе стерилизации консервов. По окончании цикла стерилизации выполняется слив воды из автоклава через нижний патрубок слива и выгрузка сеток с продуктом.

По окончании процесса стерилизации информация заносится в специальный журнал, а графики регулирования (термограммы) проверяют технологи производства, отвечающие за контроль качества продукции. Термограммы и стерилизационный журнал являются основными документами оценки качества выпускаемой продукции [68].

Автоматический контроль и регулирование процесса стерилизации имеет первостепенное значение, так как при этом резко снижается брак, сокращается время действия повышенной температуры в автоклаве, снижается расход электроэнергии, а также уменьшается численность обслуживающего персонала [78].

Для успешного внедрения на участок стерилизации консервов систем автоматизации предварительно должна быть реализована схема коммутации стерилизационного оборудования [29], которая приведена на рисунке 1.5.



1 – аккумуляющая ёмкость для холодной воды; 2 – насос; 3 – электродвигатель; 4 – компрессор; 5 – воздушный ресивер; 6 – вертикальный автоклав; 7 – регулирующие клапаны; 8 – обратные клапаны; 9 – редукционный клапан.

Рисунок 1.5 – Типовая схема коммуникации вертикального автоклава [3]

1.5 Обзор существующих систем управления процессом стерилизации консервов

Известны технические критерии, сформулированные Выскубовым Е.В. [19], которым должна отвечать система автоматизации технологического процесса стерилизации консервов в промышленном автоклаве:

- регулирование температуры в автоклаве с точностью $\pm 0,01\Theta_{CT}$ (Θ_{CT} – температура стерилизации консервов, °С);
- регулирование давления в автоклаве с точностью $\pm 0,05P_{CT}$ (P_{CT} – давление при стерилизации консервов, Па);
- ведение процесса стерилизации по времени с точностью ± 1 мин;
- универсальность по отношению к рабочей среде и типу аппарата;

- возможность оперативного изменения технологического режима;
- простота в обслуживании, надёжность и низкая стоимость.

Созданием систем управления технологическим процессом стерилизации консервов в промышленном автоклаве занимались А.П. Бабенков [25], П.В. Зеленков [26], Б.Е. Щёкин [86] и др. Однако разработанные системы лишь частично удовлетворяли вышеперечисленным критериям. У первых систем автоматического управления существовали следующие недостатки:

- недостаточно надёжная элементная база и отсутствие точных датчиков;
- низкая точность регулирования технологических параметров и, как следствие, высокий процент брака продукции;
- неустойчивая работа пневматических регуляторов давления и температуры из-за влияния колебаний давления в системе питания;
- отсутствие в системе астатического регулирования параметров, что не позволяло поддерживать их с заданной точностью;
- отсутствие гибкой настройки параметров регулятора по каждому каналу управления;
- низкая точность формирования траектории регулирования (температуры, давления и временных отрезков) и отсутствие возможности быстрого перехода на новый технологический режим работы;
- регистрация графиков процесса регулирования на бумажном носителе, что затрудняло обработку и хранение полученных данных.

В первом поколении систем автоматического управления процессом стерилизации консервов в серийное производство была запущена только система Бином-1Г, получившая наибольшее распространение на предприятиях страны.

Развитие микропроцессорной техники позволило значительно усовершенствовать системы автоматического управления. Выскубов Е.В. [19] достаточно подробно описал процесс создания эффективной системы микропроцессорного управления процессом стерилизации консервов в автоклаве. Однако, предложенная им система также обладала рядом недостатков,

обусловленных ограниченными возможностями примененных в ней средств управления. В частности, можно отметить следующие:

- при реализации системы управления требовалось создание дополнительных схем для согласования сигналов с датчиков с входами микроконтроллера и выходных сигналов управления с регулирующими клапанами;
- в системе не предусматривалась возможность заполнения автоклава водой в автоматическом режиме на подготовительном этапе процесса стерилизации;
- нет организации человеко-машинного интерфейса;
- нет процедуры по обработке и архивации данных технологического процесса в виде графиков и таблиц.

В работах Власова А.В. [17] и Кайченова А.В. [30] описан процесс создания системы управления стерилизацией консервов на базе программируемого логического контроллера, однако данная система была ориентирована на лабораторную стерилизационную установку АВК-30М, на базе которой авторы отработывали технологию стерилизации консервов, и не была опробована в работе с промышленными автоклавами.

В настоящий момент одной из наиболее распространённых систем автоматического управления процессом стерилизации консервов в автоклавах периодического действия служит система САУСТ-ПЛК г. Калининград [2]. Система построена на базе программируемого логического контроллера и цифровой панели оператора и представляет собой автоматизированное рабочее место (АРМ) оператора технологического процесса стерилизации консервов.

Хотя система САУСТ-ПЛК имеет множество достоинств в технической реализации в сравнении с ранее рассмотренными системами, однако она не имеет в свободном доступе подробного технического описания своей физической реализации и в [2] не содержатся сведения о структуре управления и реализованном в системе законе управления технологическими параметрами.

Поэтому остаётся не изученной её эффективность в различных производственных условиях на объектах консервного производства.

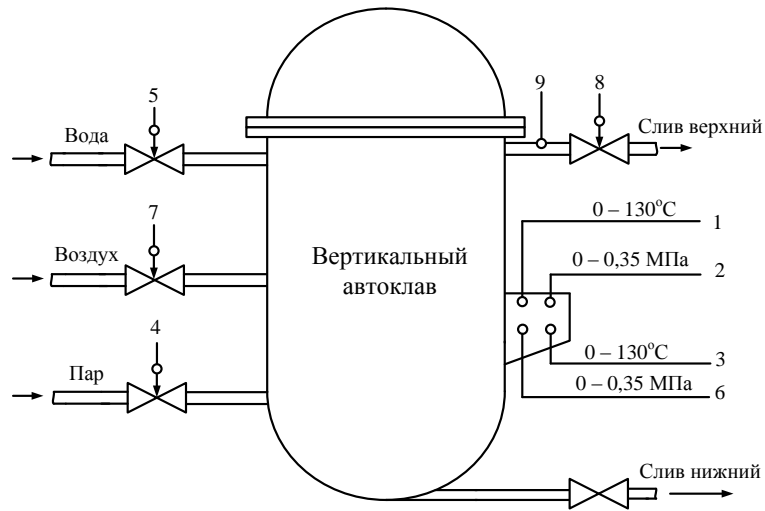
На основании проведенного анализа существующих систем управления процессом термической обработки консервов в стерилизаторах периодического действия можно сделать вывод, что, несмотря на многочисленность, разнообразие и оригинальность принятых при их реализации технических решений, в настоящее время отсутствует отвечающая всем требованиям система управления стерилизацией в автоклавах, что делает задачу ее создания актуальной.

В диссертационной работе предлагается система автоматического управления, наибольшим образом удовлетворяющая сразу всем техническим критериям, предъявляемым к системе автоматизации технологического процесса стерилизации консервов в промышленном автоклаве. В задачи системы управления входит автоматизированное выполнение подготовительных операций и взаимосвязанное управление в основном цикле процесса стерилизации сразу двумя параметрами: температурой и давлением. На рисунке 1.6 представлена структура с указанием комплекса технических средств для реализации системы автоматического управления технологическим процессом стерилизации консервов в промышленном автоклаве [46]. Система в автоматическом режиме выполняет все стадии технологического процесса: заполнение автоклава водой, ее подогрев, подъем температуры и давления до значений, заданных формулой стерилизации, собственно стерилизацию и охлаждение продукта. Система имеет дружественный человеко-машинный интерфейс, реализованный в виде автоматизированного рабочего места (АРМ) оператора.

Как видно из схемы (рисунок 1.6), система включает в себя два контура управления:

- контур регулирования температуры греющей среды в автоклаве;
- контур создания противодавления в автоклаве.

Кроме двух основных контуров управления, в схеме можно выделить ещё один вспомогательный контур заполнения автоклава водой, используемый во время подготовительного режима.



		1	2	3	4	5	6	7	8	5	9	5
	Приборы по месту	TI 1-1	PI 2-1	TE 3-1	N 3-5	N 3-6	PE 4-1	N 4-5	N 4-6	N 5-3	LE 6-1	N 6-4
Щит управления	Программируемый логический контроллер			ТС 3-2			PC 4-2			LKS 5-1	LS 6-2	
	Программа пк	Входы										
		Выходы										
	Регулирование											
	Панель оператора			PIA 3-3			PIA 4-3			LIA 5-2	LIA 6-3	
	Устройство для архивации данных			TR 3-4			PR 4-4					
	Наименование измеряемого и регулируемого параметра	Датчик измерения температуры	Датчик измерения давления	Канал измерения и регулирования температуры			Канал измерения и регулирования давления			Канал заполнения автоклава водой по времени		Канал контроля верхнего уровня воды

TI- показывающий термометр; TE – датчик температуры с выходным сигналом 4-20mA; TC – регулятор температуры; TIA – отображение текущего значения и сигнализации аварий канала измерения температуры; TR – регистрация температуры; PI – показывающий манометр; PE – датчик давления с выходным сигналом 4-20mA; PC – регулятор давления; PIA – отображение текущего значения и сигнализации аварий канала измерения давления; PR – регистрация давления; N – электропневматический преобразователь; LE – датчик-реле уровня воды; LS – контроль уровня воды; LKS – набор уровня воды по времени; LIA – отображение и сигнализация аварий канала уровня воды.

Рисунок 1.6 - Схема автоматизации технологического процесса стерилизации консервов в промышленном автоклаве

С целью оптимизации количества приборов управления в качестве единого управляющего элемента используется программируемый логический контроллер (ПЛК), позволяющий реализовать на базе одного устройства схему автоматизации с требуемым количеством каналов измерения и управления. ПЛК, в отличие от микропроцессора, является готовым устройством управления и имеет в себе все необходимые каналы ввода и вывода, а так же интерфейсы связи [53].

В качестве первичных измерительных преобразователей в канале температуры и давления предлагается использовать датчики с унифицированным выходным сигналом 4-20 мА, что увеличивает защищённость каналов измерения от помех.

В предлагаемой системе управления на стадии подготовительных операций незагруженный автоклав вначале автоматически заполняется водой в течение заданного промежутка времени. После заполнения автоклава водой до нижнего уровня по команде оператора производится подогрев воды до заданной температуры. После загрузки оператором сеток с консервами в автоклав его крышку герметично закрывают. Оператор запускает основной режим работы. Система автоматически набирает воду в автоклав до срабатывания верхнего датчика уровня 10 (датчик срабатывает при контакте с водой), проверяет герметичность автоклава и начинает основную фазу процесса стерилизации.

Для организации человеко-машинного интерфейса используется панель оператора, предназначенная для ввода формулы стерилизации, мониторинга и редактирования значений параметров технологического процесса. На экране панели отображается ход выполнения технологического процесса и выполняется редактирование значений параметров функционирования системы.

Устройство и программа архивации данных предназначены для сбора, хранения на карте памяти или персональном компьютере (ПК) данных, полученных от ПЛК.

Все обозначенные в схеме 1.6 устройства являются серийно выпускаемыми отечественной промышленностью, что делает систему доступной в реализации.

В отличие от схемы, разработанной Выскубовым Е.В., на базе микропроцессорного управления, предложенная схема автоматизации технологического процесса на основе ПЛК обеспечит [46]:

- автоматическое заполнение автоклава водой и её предварительный нагрев во время подготовительного режима;
- автоматическое регулирование параметров процесса стерилизации с применением двухконтурного четырёхканального программного регулятора, что позволит добиться высоких показателей качества процесса регулирования;
- создание автоматизированного рабочего места (АРМ) оператора, реализованного на основе цифровой панели оператора и ПК, что позволит осуществлять ввод формул стерилизации, наблюдать за ходом технологического процесса в режиме реального времени, отражать предаварийные и аварийные ситуации;
- архивацию данных о технологическом процессе (регистрацию давления и температуры по времени) с целью их централизованного сбора, что позволит формировать архив по каждой процедуре стерилизации консервов с возможностью просмотра и распечатки графиков на принтере.

Все это позволяет добиться [47]:

- выпуска продукции требуемого качества благодаря точному соблюдению технологического режима;
- экономии энергоресурсов за счёт точного регулирования технологических параметров и соблюдения алгоритмов работы;
- безопасного функционирования автоклава за счёт наличия необходимых защит, блокировок и системы аварийных оповещений;
- снижения трудоёмкости в обслуживании автоклава и его системы автоматического управления;
- увеличения ресурса автоклава путем точного соблюдения его технологического режима работы;
- сокращения расходов на ремонт системы управления.

Выводы по первой главе

1. В ходе исследования выделены особенности процесса стерилизации консервов в вертикальных автоклавах периодического действия. К ним относятся: стадийность технологического процесса, управление двумя взаимосвязанными параметрами (температурой и давлением) и использование для регулирования обозначенных параметров четырёх взаимосвязанных каналов управления.

2. Установлено, что кроме типовых возмущений, связанных с изменением начальной температуры стерилизуемой продукции и различной степенью загрузки аппарата, процесс стерилизации подвержен главному возмущению, связанному с нестабильностью параметров в подающих трубопроводах.

3. Обоснована целесообразность разработки программно-аппаратного комплекса управления технологическим процессом стерилизации консервов, реализуемого на базе программируемого логического контроллера.

ГЛАВА 2. СОЗДАНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА СТЕРИЛИЗАЦИИ КОНСЕРВОВ В ПРОМЫШЛЕННОМ АВТОКЛАВЕ

2.1 Математическое описание изменения технологических параметров в промышленном автоклаве

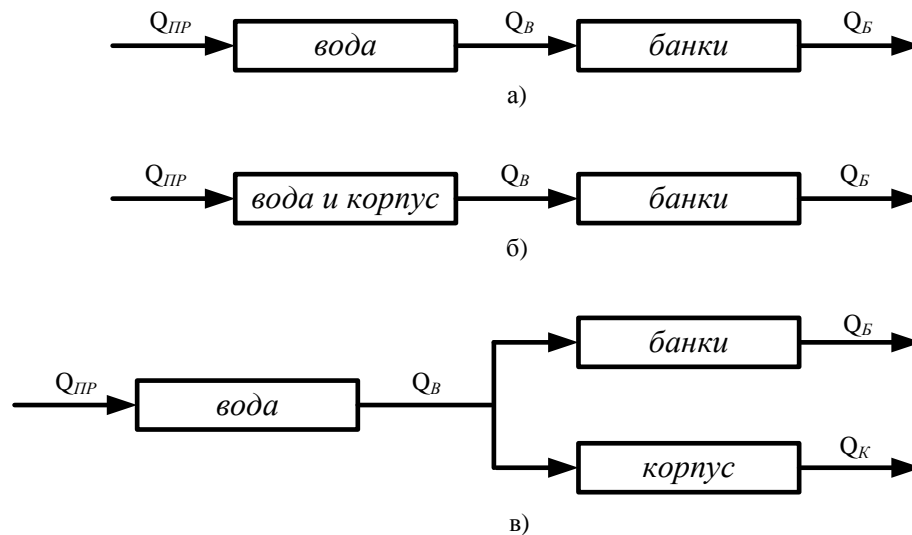
Автоклав является объектом, в котором протекает два взаимосвязанных процесса: процесс изменения температуры и процесс изменения давления. В отличие от простых теплообменных аппаратов, предназначенных только для передачи тепла от тепло – (холодо-) носителя к продукту, тепловой процесс в автоклаве сопровождается технологически необходимым избыточным давлением. С этой точки зрения автоклав как объект автоматизации имеет две взаимосвязанные регулируемые величины.

Наиболее полные исследования автоклава как объекта автоматизации проведены Б.Е. Щёкиным [86].

При стерилизации консервов в стеклянной таре основной аккумулирующей теплоёмкостью является вода, а тепловой ёмкостью паровоздушной среды можно пренебречь.

В соответствии с этим с точки зрения теплообмена (по учёту тепловых ёмкостей) автоклав можно рассмотреть в трёх вариантах [8]:

- учитывается только тепловая ёмкость воды и продукта в банках, а тепловой ёмкостью корпуса пренебрегаем (рисунок 2.1 а);
- учитывается тепловая ёмкость воды, продукта и корпуса автоклава, причём температура корпуса принимается равной температуре воды в автоклаве (рисунок 2.1 б);
- учитывается тепловая ёмкость воды, продукта и корпуса автоклава, причём температура корпуса отлична от температуры воды (рисунок 2.1 в).

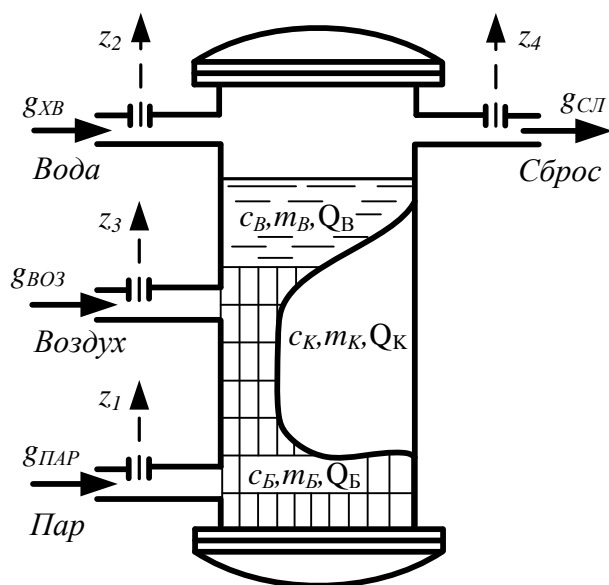


$Q_{ПР}$ – количество передаваемого тепла в автоклав; Q_B – количество тепла передаваемого теплоносителю (воде) в автоклаве; Q_B – количество тепла передаваемого продукту в банках; Q_K – количество тепла передаваемого корпусу (стенкам) автоклава.

Рисунок 2.1 - Схема теплообмена в автоклаве в зависимости от вида учитываемых тепловых емкостей

Хотя многие исследователи подтвердили [8,34,86], что рассмотрение автоклава как объекта с сосредоточенными параметрами (рисунок 2.1б) вполне допустимо и позволяет получить достоверные результаты при относительной простоте математического описания, всё же, по мнению автора, последний вариант (рисунок 2.1в) наибольшим образом соответствует физической природе протекающих в автоклаве теплообменных процессов [43].

В остальном, что касается тепловых процессов внутри консервных банок, допустимо считать автоклав объектом с сосредоточенными параметрами (рисунок 2.2) и не рассматривать тепловые процессы внутри самих банок, что доказано в работах [89, 39, 92,94].



Q_B – количество тепла, передаваемого теплоносителю (воде) в автоклаве; Q_B – количество тепла, передаваемого продукту в банках; Q_K – количество тепла, передаваемого корпусу автоклава; m_B – масса воды в автоклаве; m_B – масса продукта в банках; m_K – масса корпуса автоклава; c_B – удельная теплоёмкость воды; c_B – удельная теплоёмкость продукта в банках; c_K – удельная теплоёмкость стали корпуса автоклава; z – ход плунжера соответствующего регулирующего клапана (исполнительного механизма); g_{XB} – массовый расход холодной воды; $g_{ПАР}$ – массовый расход пара; $g_{СЛ}$ – массовый расход паровоздушной смеси через сливной клапан; g_{BO3} – массовый расход воздуха.

Рисунок 2.2 - Расчётная схема вертикального автоклава при стерилизации паром с противодавлением консервов в стеклянной таре

Структурная схема имитационной модели процесса стерилизации консервов в воде, подогреваемой паром, представлена на рисунке 2.3. Буквенные обозначения на структурной схеме (рисунок 2.3): $P_{ПАР}$ – давление в паровой магистрали, МПа; P_{XB} – давление в магистрали холодной воды, МПа; $P_{СЛ}$ – давление в магистрали слива паровоздушной смеси, МПа; P_{BO3} – давление в

магистральной подачи воздуха, МПа; *МИМ* – мембранный исполнительный механизм (регулирующий клапан); X – сигнал управления исполнительным механизмом; $g_{ПАР}$ – массовый расход пара, кг/с; $g_{ХВ}$ – массовый расход холодной воды, кг/с; $g_{СЛ}$ – массовый расход паровоздушной смеси через сливной клапан, кг/с; $g_{ВОЗ}$ – массовый расход воздуха, кг/с; $P_{ПВС}$ – давление паровоздушной смеси в автоклаве, Па; Θ_B – температура воды в автоклаве, °С; $\Theta_{\text{Б}}$ – температура банок, °С; Θ_K – температура корпуса автоклава, °С; Θ_{OC} – температура окружающей среды, °С; P_{ABT} – полное давление в автоклаве, Па; Θ_{ABT} – температура в автоклаве, °С.

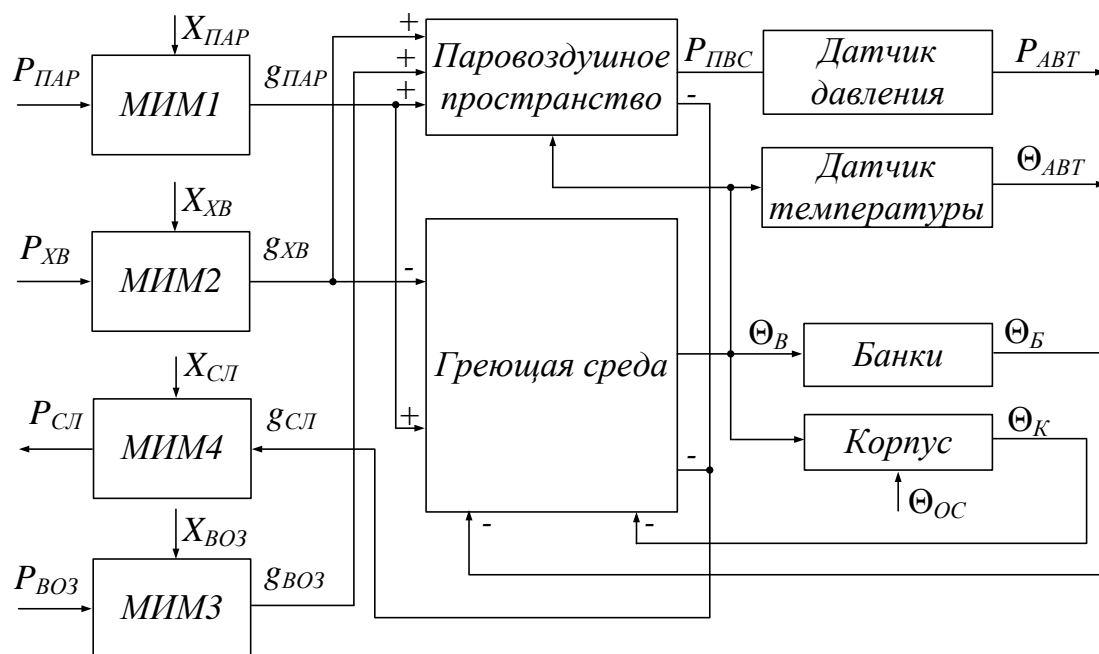


Рисунок 2.3 - Структурная схема модели технологического процесса стерилизации консервов в автоклаве

2.1.1 Математическое описание процесса изменения температуры в автоклаве

Уравнение баланса тепловой энергии в автоклаве при стерилизации консервов в воде, подогреваемой паром, для бесконечно малого промежутка времени dt , имеет вид [8]:

$$g_{ПАР}r - g_{XB}c_B(\Theta_B - \Theta_{XB}) - g_{СЛ}\Theta_B c_B - q_{ПОТ} - q_B - q_K = m_B c_B \frac{d\Theta_B}{dt}, \quad (2.1)$$

где $g_{ПАР}$ – массовый расход пара через регулирующий клапан, кг/с;

g_{XB} – массовый расход холодной воды через регулирующий клапан, кг/с;

$g_{СЛ}$ – массовый расход паровоздушной смеси через сливной регулирующий клапан, кг/с;

q_B – тепловой поток к стерилизуемым банкам, Дж/с;

q_K – тепловой поток к корпусу автоклава, Дж/с;

$q_{ПОТ}$ – тепловые потери корпуса автоклава, Дж/с;

Θ_B – температура воды в автоклаве, °С;

Θ_{XB} – температура холодной воды, °С;

$d\Theta_B$ – приращение температуры греющей среды за время dt ;

r – удельная теплота парообразования, Дж/кг;

c_B – удельная теплоёмкость воды, Дж/(кг °С);

m_B – масса воды в автоклаве, кг.

Тепловой поток, направленный к банкам [86]:

$$q_B = \alpha_{ББ} F_B (\Theta_B - \Theta_{Б}), \quad (2.2)$$

где $\alpha_{ББ}$ – коэффициент теплоотдачи вода-банка, Дж/(м² с °С);

F_B – площадь внешних поверхностей всех банок, м²;

$\Theta_{Б}$ – температура банок, °С.

Тепловой поток, направленный к корпусу автоклава:

$$q_K = \alpha_{BC} F_K (\Theta_B - \Theta_K), \quad (2.3)$$

где α_{BC} – коэффициент теплоотдачи вода-сталь, Дж/(м² с °С);
 F_K – площадь поверхности корпуса автоклава, м²;
 Θ_K – температура корпуса автоклава, °С.

Тепловой поток, направленный в окружающую среду:

$$q_{пот} = \alpha_{CB} F_K (\Theta_K - \Theta_{OC}), \quad (2.4)$$

где α_{CB} – коэффициент теплоотдачи сталь-воздух, Дж/(м² с °С);
 Θ_{OC} – температура окружающей среды, °С.

Приращение температуры банок [19]:

$$d\Theta_B = \frac{q_B}{m_B c_B} dt, \quad (2.5)$$

где $d\Theta_B$ – приращение температуры банок, °С;
 m_B – масса банок, кг;
 c_B – удельная теплоёмкость банок, Дж/(кг °С).

Приращение температуры корпуса автоклава:

$$d\Theta_K = \frac{q_K - q_{пот}}{m_K c_K} dt, \quad (2.6)$$

где $d\Theta_K$ – приращение температуры корпуса автоклава, °С;
 m_K – масса корпуса автоклава, кг;

c_K – удельная теплоёмкость стали корпуса автоклава, Дж/(кг °С).

С учетом представленных выше допущений, на основании уравнения (2.1) баланса тепловой энергии в автоклаве при стерилизации консервов в воде, разработана структурная схема канала регулирования температуры (рисунок 2.4).

Числовые значения констант, входящих в структурную схему, сведены в таблицу 2.1.

Таблица 2.1 – Числовые значения констант в структурной схеме

Название константы	Буквенное обозначение	Единицы измерения	Значение
Температура воды в автоклаве начальная	Θ_{B0}	°С	75
Температура холодной воды	Θ_{XB}	°С	20
Температура банок начальная	Θ_{B0}	°С	70
Температура окружающей среды	Θ_{OC}	°С	25
Температура корпуса автоклава начальная	Θ_{K0}	°С	25
Площадь внешних поверхностей всех банок	F_B	м ²	38,7
Площадь поверхности корпуса автоклава	F_K	м ²	8,4
Масса воды в автоклаве	m_B	кг	1160
Масса банок	m_B	кг	461,1
Масса корпуса автоклава	m_K	кг	1210
Удельная теплоёмкость воды	c_B	Дж/(кг °С)	4190
Удельная теплоёмкость банок с продуктом	c_B	Дж/(кг °С)	3680
Удельная теплоёмкость стали корпуса автоклава	c_K	Дж/(кг °С)	480
Коэффициент теплоотдачи вода-банка	α_{BB}	Дж/(м ² с °С)	1450
Коэффициент теплоотдачи вода-сталь	α_{BC}	Дж/(м ² с °С)	200
Коэффициент теплоотдачи сталь-воздух	α_{CB}	Дж/(м ² с °С)	10,79
Удельная теплота парообразования	r	Дж/кг	2260000

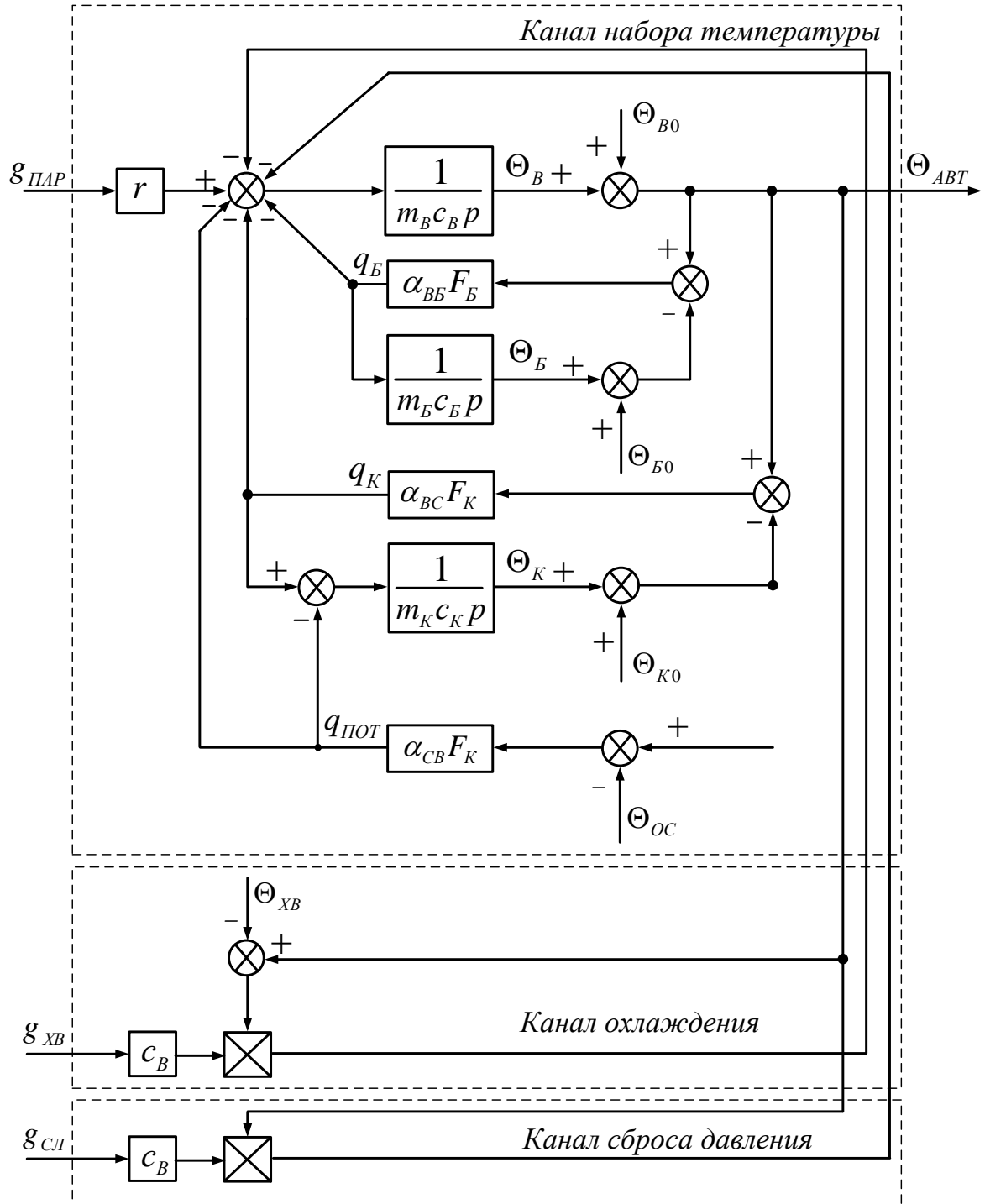


Рисунок 2.4 – Структурная схема канала регулирования температуры в автоклаве

2.1.2 Математическое описание процесса изменения давления в автоклаве

Давление в автоклаве определяется тремя слагаемыми: парциальным давлением насыщенного водяного пара, парциальным давлением воздуха и давлением столба воды. Последняя составляющая переменна по высоте аппарата и в месте расположения датчиков пренебрежимо мала, поэтому её влияние не учитывают. Давление в автоклаве P_{ABT} , Па можно рассчитать по формуле [19]:

$$P_{ABT} = P_{ПАР} + P_{ВОЗ}, \quad (2.7)$$

где $P_{ПАР}$ – давление насыщенного водяного пара, Па;

$P_{ВОЗ}$ – парциальное давление воздуха, Па.

Парциальное давление насыщенного водяного пара зависит от температуры. Поэтому, зная температуру рабочей среды в автоклаве, по таблице состояния насыщенного пара на кривой насыщения [67] можно определить его значение. Полученный методом наименьших квадратов полином, аппроксимирующий эту зависимость в диапазоне от 0 до 130 °С с точностью до 197 Па, имеет вид:

$$P_{ПАР} = 0,001\Theta_{ABT}^4 - 0,069\Theta_{ABT}^3 + 5,794\Theta_{ABT}^2 - 24,929\Theta_{ABT} + 757,749. \quad (2.8)$$

Парциальное давление воздуха на основании закона Менделеева-Клапейрона:

$$P_{ВОЗ} = \frac{m_{ВОЗ}R(\Theta_{ABT} + 273)}{V_{ВОЗ0}}, \quad (2.9)$$

где $m_{ВОЗ}$ – масса воздуха в автоклаве, кг;

$V_{ВОЗ0} = 0,25\text{м}^3$ – начальный объём воздуха в автоклаве, м³;

Θ_{ABT} – температура в автоклаве, °С;

$R = 286$ Дж/(кг·К) – газовая постоянная.

Газовая постоянная R представляет собой физическую постоянную, которая для каждого газа принимает вполне определенное значение, зависящее от природы газа и не зависящее от его состояния.

Масса воздуха в динамике:

$$dm_{\text{ВОЗ}} = (g_{\text{ВОЗ}} - g_{\text{СЛ}}) dt, \quad (2.10)$$

где $g_{\text{ВОЗ}}$ – массовый расход воздуха через регулирующий клапан, кг/с.

Приращение парциального давления воздуха, Па:

$$dP_{\text{ВОЗ}} = \left(\frac{(g_{\text{ВОЗ}} - g_{\text{СЛ}})}{V_{\text{ВОЗ}}} R (\Theta_{\text{АВТ}} + 273) \right) dt. \quad (2.11)$$

Представленный материал позволяет расширить структурную схему, показанную на рисунке 2.4, и учесть влияние давления на поведение исследуемой системы (рисунок 2.5).

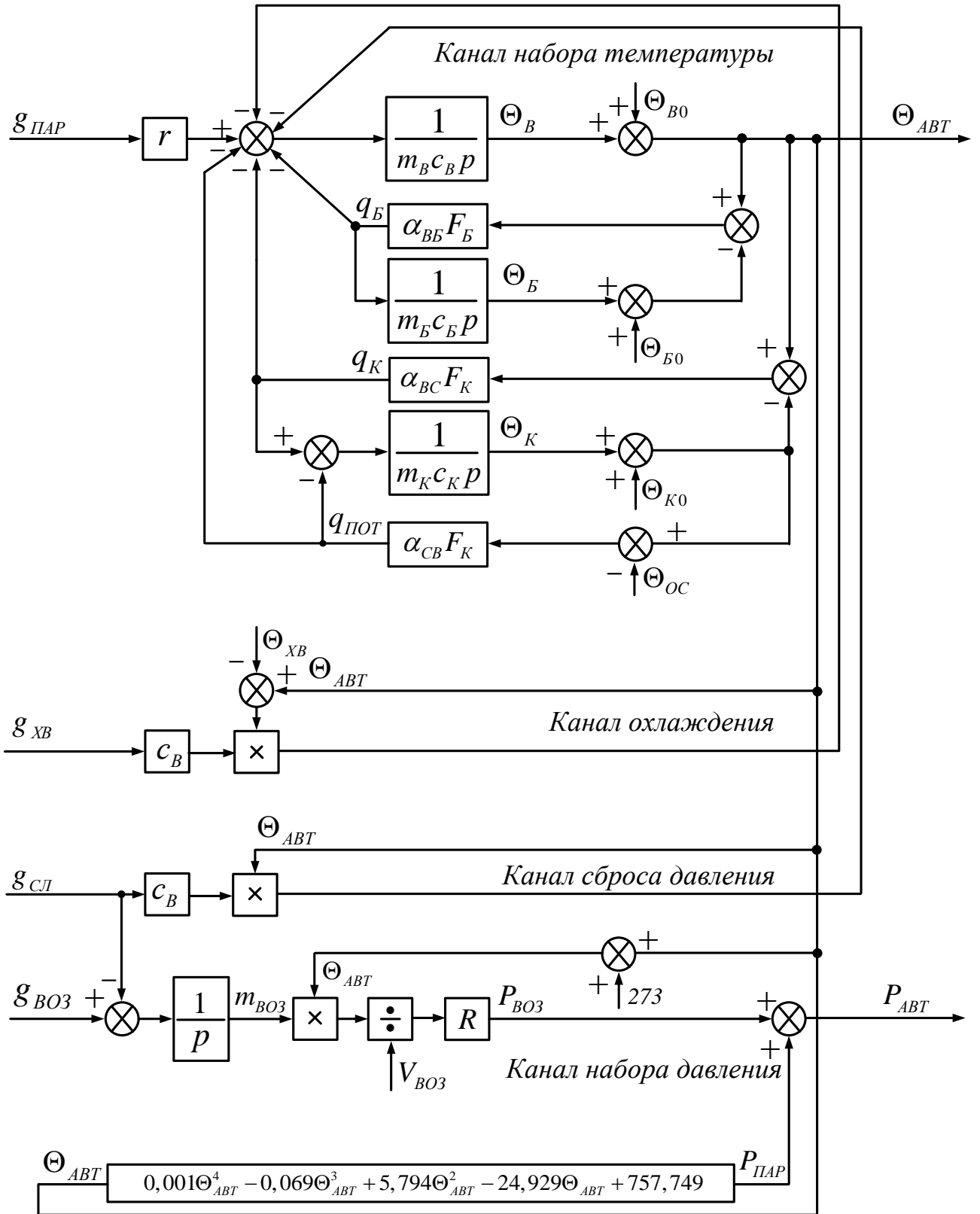


Рисунок 2.5 – Структурная схема регулирования канала температуры и давления в автоклаве

2.2 Математическое моделирование процесса изменения температуры и давления в автоклаве

Входными параметрами для регулирования температуры и давления в структурной схеме (рисунок 2.5) являются расход пара, воды, воздуха и паровоздушной смеси. Для регулирования массового расхода в трубопроводе устанавливают регулирующий клапан.

Выбор типа регулирующей арматуры (регулирующего вентиля, регулирующего клапана и т. д.) определяется её назначением. Для непрерывного регулирования расхода среды с целью изменения регулируемых параметров температуры и давления в автоклавах используются односедельные (или двухседельные) клапаны с пневматическим мембранным исполнительным механизмом (МИМ). Расход регулируемой среды изменяется в соответствии с сигналом, поступающим от управляющего устройства. Регулирование расхода происходит за счёт изменения степени открытия сечения между плунжером и седлом внутри клапана [23]. Площадь открытого сечения зависит от положения плунжера относительно седла. Положение плунжера определяется положением равновесия подвижной системы клапан — МИМ. Равновесие системы создается в момент равенства силы от давления воздуха на мембрану и усилия пружины. Силовая характеристика пружины имеет линейную зависимость от степени сжатия (относительного хода пружины). Перемещение плунжера происходит пропорционально давлению воздуха на мембрану, если не учитывать влияния незначительной нелинейности некоторых параметров пружины и мембраны. Профиль плунжера обеспечивает изменение расхода с минимального до максимального значения. Для автоклавов применяются клапаны с нормально закрытым исполнением.

Изменение пропускной способности осуществляется перемещением подвижной части регулирующего органа, который называется затвором.

Проходное сечение регулирующего органа образуется между седлом и затвором. Седлом является неподвижная кольцевая часть регулирующего органа.

Электропневматический позиционер с электрическим входным сигналом управления 4-20 мА устанавливается на пневматические исполнительные механизмы и служит для преобразования управляющего сигнала в усилие пневматического привода. Кроме того, позиционер на регулирующем клапане уменьшает рассогласование управляющего сигнала и регулирующего воздействия путем введения обратной связи по положению выходного элемента исполнительного механизма. Датчик положения дает информацию о положении выходного элемента исполнительного механизма, чем является затвор регулирующего органа.

Для автоклавов наиболее эффективны пневматические исполнительные механизмы, так как могут обеспечивать быстрое приведение из рабочего состояния в положение безопасности, постоянную герметичность и высокую чувствительность к управляющему сигналу. Регулирующий клапан вместе с пневмоприводом и электропневмопозиционером образуют управляющий контур, подчиненный устройству управления всем технологическим процессом.

Пропускная способность K_v определяется объемным расходом жидкости в м³/ч с плотностью среды (для воды равной 1000 кг/м³), пропускаемой регулирующим органом при перепаде давления на нем в 1 кгс/см². Текущее значение пропускной способности при заданной величине хода (в процентах) указывается соответствующим индексом.

Пропускная характеристика $K_v = f(z)$ определяет зависимость пропускной способности от перемещения затвора z . В автоклавах удобнее использовать односедельные регулирующие клапаны с линейной пропускной характеристикой. Данная характеристика является наиболее часто применяемой на производстве при регулировании технологических процессов. Линейная пропускная характеристика обеспечивает приращение пропускной способности пропорционально перемещению затвора. Рабочая расходная характеристика

определяет зависимость расхода в рабочих условиях от перемещения затвора. Так осуществляется контроль на всём рабочем диапазоне регулирования.

Линейная характеристика используется при постоянном перепаде давления в условиях изменения нагрузки. Линейная характеристика соответствует равным приращениям значения пропускной способности K_v при равных приращениях хода.

Массовый расход среды (воды, пара, воздуха и удаления паровоздушной смеси из автоклава) через пневматическое односедельное исполнительное устройство определяется как [27]:

$$g_{\text{КЛ}} = \mu_{\text{КЛ}} S_{\text{КЛ}} \sqrt{2\rho(P_M - P_{\text{АВТ}})}, \quad (2.12)$$

где $g_{\text{КЛ}}$ – массовый расход среды через регулирующий орган, кг/с;

$\mu_{\text{КЛ}}$ – коэффициент расхода клапана (0,5-0,7) [23];

P_M – давление в магистрали, Па;

$P_{\text{АВТ}}$ – давление в автоклаве, Па;

ρ – плотность среды, кг/м³;

$S_{\text{КЛ}} = \frac{3,14 \cdot \left(d_0^2 - \left(d_0 - \frac{X \cdot d_0}{X_{\text{max}}} \right)^2 \right)}{4}$ – площадь проходного сечения

клапана, м²;

d_0 – диаметр проходного сечения клапана, м;

X_{max} – максимальный ход регулирующего органа, %;

X – заданный ход регулирующего органа, %.

Плотность различных сред [36]:

$\rho_{\text{ПАР}} = 2,163 \text{ кг} / \text{м}^3$ – плотность пара, кг/м³;

$\rho_{\text{ХВ}} = 1000 \text{ кг} / \text{м}^3$ – плотность воды, кг/м³;

$\rho_{\text{ВОЗ}} = 1,2 \text{ кг} / \text{м}^3$ – плотность воздуха, кг/м³.

Используя формулы (2.12) можно рассчитать максимальный массовый расход для всех входных трубопроводов: пара, воды, воздуха и трубопроводе слива паровоздушной смеси.

Массовый расход при полностью открытом клапане подачи пара:

$$g_{ПАР} = 0,7 \cdot \frac{3,14 \cdot (0,05)^2}{4} \sqrt{2 \cdot 2,163 \cdot (400000 - 0)} = 1,8 \text{ кг / с.}$$

Массовый расход при полностью открытом клапане подачи холодной воды:

$$g_{ХВ} = 0,7 \cdot \frac{3,14 \cdot (0,05)^2}{4} \sqrt{2 \cdot 1000 \cdot (400000 - 0)} = 38,856 \text{ кг / с.}$$

Массовый расход при полностью открытом клапане подачи воздуха:

$$g_{ВОЗ} = 0,7 \cdot \frac{3,14 \cdot (0,05)^2}{4} \sqrt{2 \cdot 1,2 \cdot (400000 - 0)} = 1,346 \text{ кг / с.}$$

Массовый расход при полностью открытом клапане слива паровоздушной смеси из автоклава:

$$g_{СЛ} = 0,7 \cdot \frac{3,14 \cdot (0,05)^2}{4} \sqrt{2 \cdot 1,2 \cdot |(0 - 400000)|} = 0,134 \text{ кг / с.}$$

Динамическая структурная схема модели процесса изменения температуры и давления в автоклаве с учётом свойств регулирующих органов по каждому каналу воздействия (пара, воды, воздуха и слива) приведена на рисунке 2.6. В основу моделей регулирующих клапанов по каждому каналу заложено выражение 2.12.

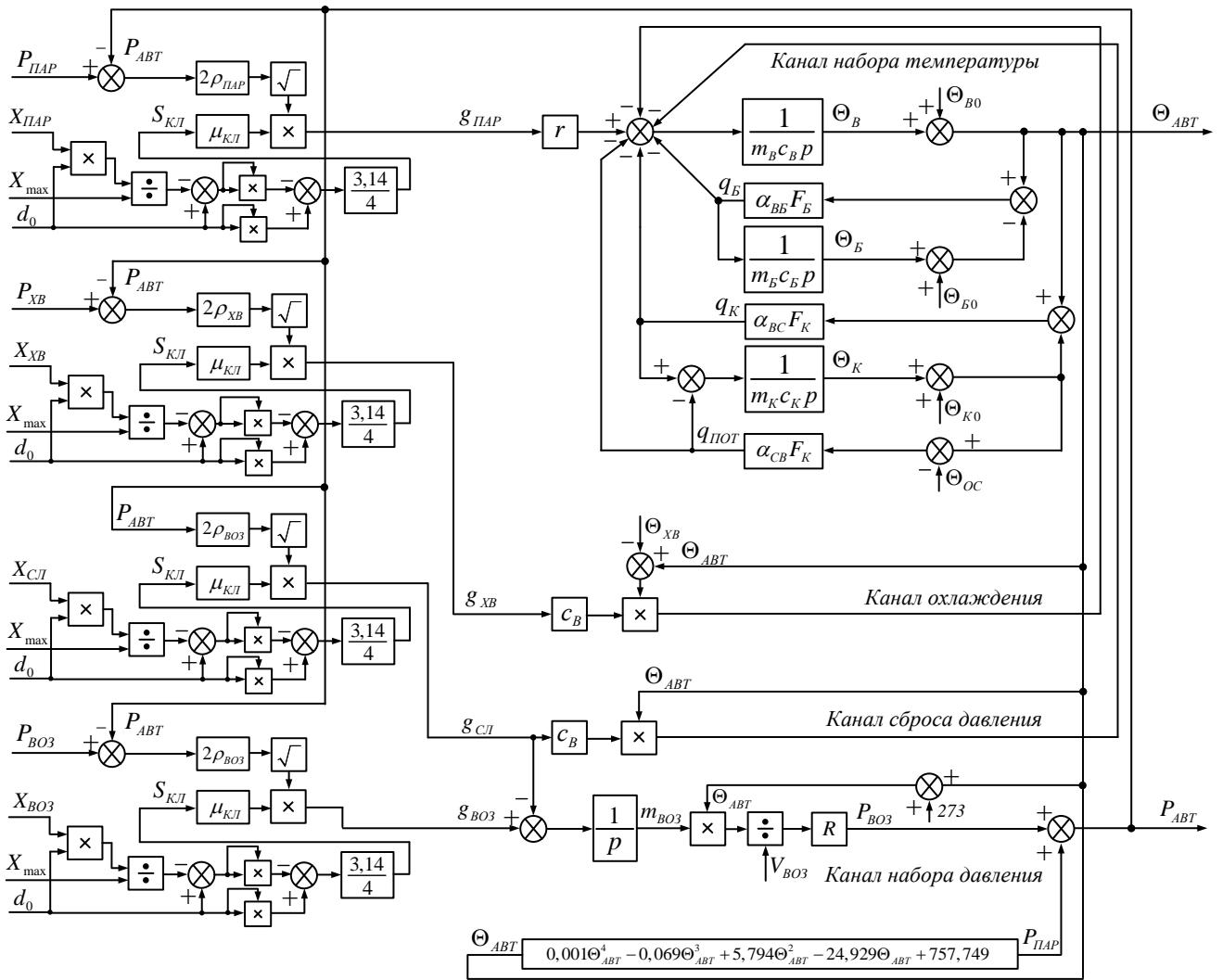


Рисунок 2.6 – Структурная схема модели автоклава с учётом исполнительных механизмов

На рисунке 2.6 дополнительно используются следующие буквенные обозначения: $X_{ПАР}$ – сигнал управления клапаном паровой магистрали, % хода регулирующего органа; $X_{ХВ}$ – сигнал управления клапаном подачи холодной воды, % хода регулирующего органа; $X_{ВОЗ}$ – сигнал управления клапаном подачи сжатого воздуха, % хода регулирующего органа; $X_{СЛ}$ – сигнал управления клапаном слива паровоздушной смеси из автоклава, % хода регулирующего органа.

Схема моделирования с подставленными в неё числовыми значениями констант, показана в Приложении А (рисунок А.1).

В настоящее время одним из самых мощных инструментов познания, анализа и проектирования, которым располагают специалисты, ответственные за разработку и функционирование сложных технологических процессов и производств является компьютерное моделирование. Компьютерное моделирование позволяет значительно повысить эффективность исследований за счет существенного снижения временных и материальных затрат. Сущность методологии компьютерного моделирования состоит в замене исходного технологического объекта математической моделью и изучении модели с помощью реализуемых на компьютерах вычислительных алгоритмов.

В качестве среды для реализации модели канала регулирования температуры и давления (рисунок 2.6) использована система компьютерного моделирования Matlab с пакетом Simulink. Данная математическая среда, описанная в [84], позволяет строить структурные и имитационные модели систем автоматического управления технологическими процессами и объектами.

Модель процесса нарастания, стабилизации и сброса температуры и давления в автоклаве при подаче пара, воды и воздуха из магистрали с постоянным давлением и слива паровоздушной смеси, реализованная в программной среде Simulink, имеет вид, показанный на рисунке 2.7.

Назначение входных и выходных сигналов у модели канала регулирования температуры и давления в Simulink описаны в таблице 2.2.

Пригодность математической модели процесса стерилизации консервов для решения задач имитационного исследования, а также задач автоматического управления во многом определяется точностью прогноза по математической модели параметров технологического процесса. Особенностью математической модели процесса стерилизации консервов (рисунок 2.7) является то, что она состоит из двух взаимосвязанных математических моделей отдельных процессов. Сложность математической модели требует разработки специальной методики ее идентификации.

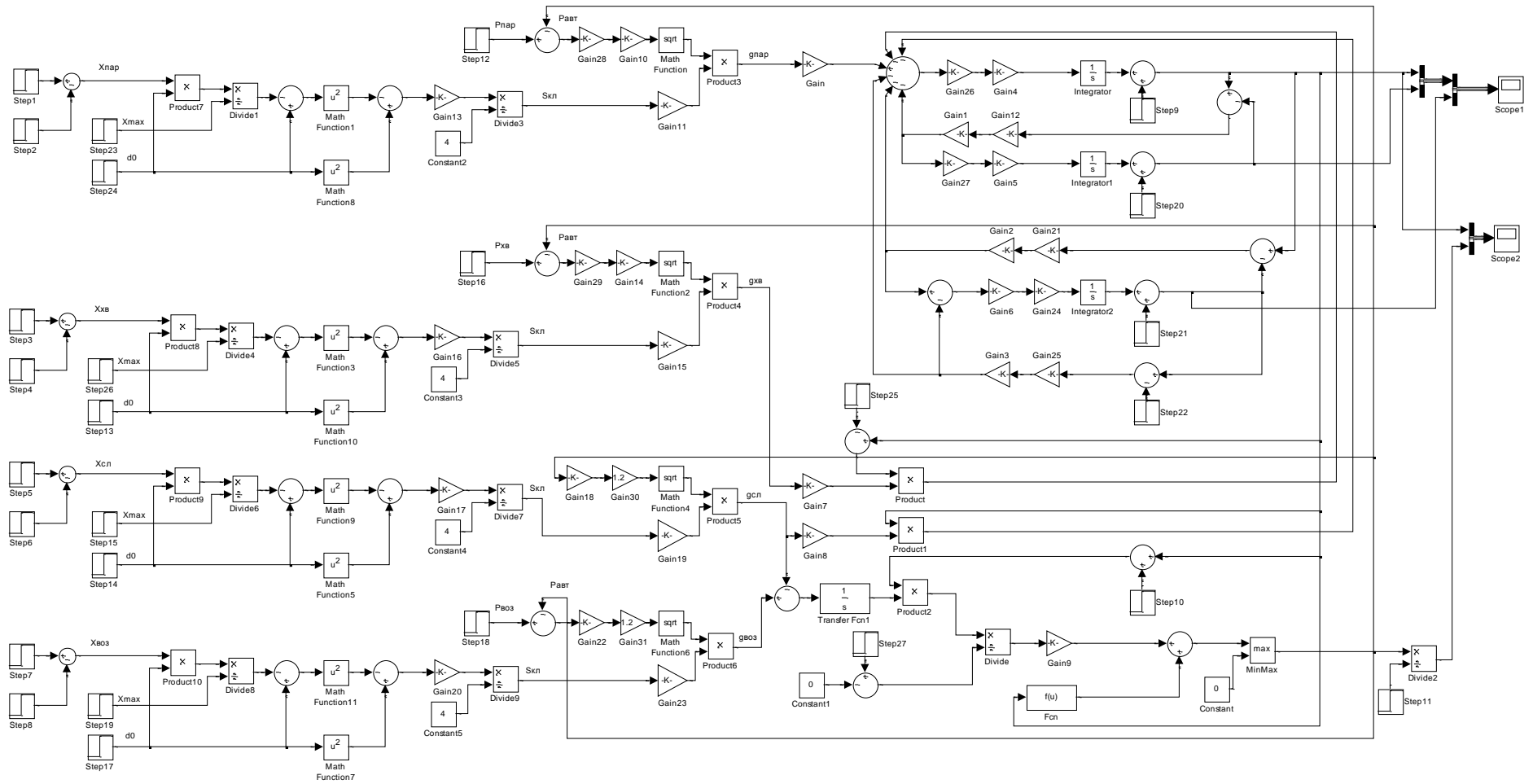


Рисунок 2.7 – Схема моделирования канала регулирования температуры и давления в Simulink

Таблица 2.2 – Входные и выходные параметры в модели (рисунок 2.7)

Обозначение блока	Описание блока	Передаваемый параметр	Размерность параметра
Step	Генератор ступенчатого сигнала	Процент открытия регулирующего органа (клапана) паровой магистрали	%
Step2	Генератор ступенчатого сигнала	Процент закрытия регулирующего клапана паровой магистрали	%
Step3	Генератор ступенчатого сигнала	Процент открытия регулирующего клапана магистрали подачи холодной воды	%
Step4	Генератор ступенчатого сигнала	Процент закрытия регулирующего клапана магистрали подачи холодной воды	%
Step5	Генератор ступенчатого сигнала	Процент открытия регулирующего клапана магистрали слива паровоздушной смеси из автоклава	%
Step6	Генератор ступенчатого сигнала	Процент закрытия регулирующего клапана магистрали слива паровоздушной смеси из автоклава	%
Step7	Генератор ступенчатого сигнала	Процент открытия регулирующего клапана магистрали подачи сжатого воздуха	%
Step8	Генератор ступенчатого сигнала	Процент закрытия регулирующего клапана магистрали подачи сжатого воздуха	%
Scope1	Осциллограф	Отображение температуры воды, банок и корпуса в автоклаве	°С
Scope2	Осциллограф	Отображение температуры воды и полного давления в автоклаве	°С , кПа

Для имитационного исследования влияния режимных параметров и условий функционирования на качественные показатели технологического процесса стерилизации консервов, а также решения задач управления процессом стерилизации в широком спектре возмущающих воздействий, требуется математическая модель процесса (рисунок 2.7), адекватная протекающим в нем процессам во всем диапазоне возможных режимов работы.

Так как схема моделирования канала регулирования температуры и давления в Simulink (рисунок 2.7) получилась довольно громоздкой и не удобной для дальнейшего использования при синтезе системы регулирования, предлагается объединить её в подсистему Simulink.

Подсистема — это фрагмент Simulink-модели, оформленный в виде отдельного блока. Использование подсистем при составлении модели имеет следующие положительные стороны [84]:

- уменьшается количество одновременно отображаемых блоков на экране монитора, что позволяет полностью отображать модель, облегчая её восприятие;
- повышается технологичность модели за счёт создания и отладки её фрагментов по отдельности;
- создаются пользовательские библиотеки с включением в модель собственных справочных средств;
- появляется возможность синхронизировать параллельно работающие подсистемы.

Для создания в модели элемента в виде подсистемы выбирается фрагмент модели и объединяется в подсистему, а входы и выходы элемента снабжаются соответствующими портами. Модель технологического процесса регулирования температуры и давления в автоклаве, оформленная в виде подсистемы Simulink, приведена на рисунке 2.8. Назначение входных и выходных портов подсистемы описано в таблице 2.3.

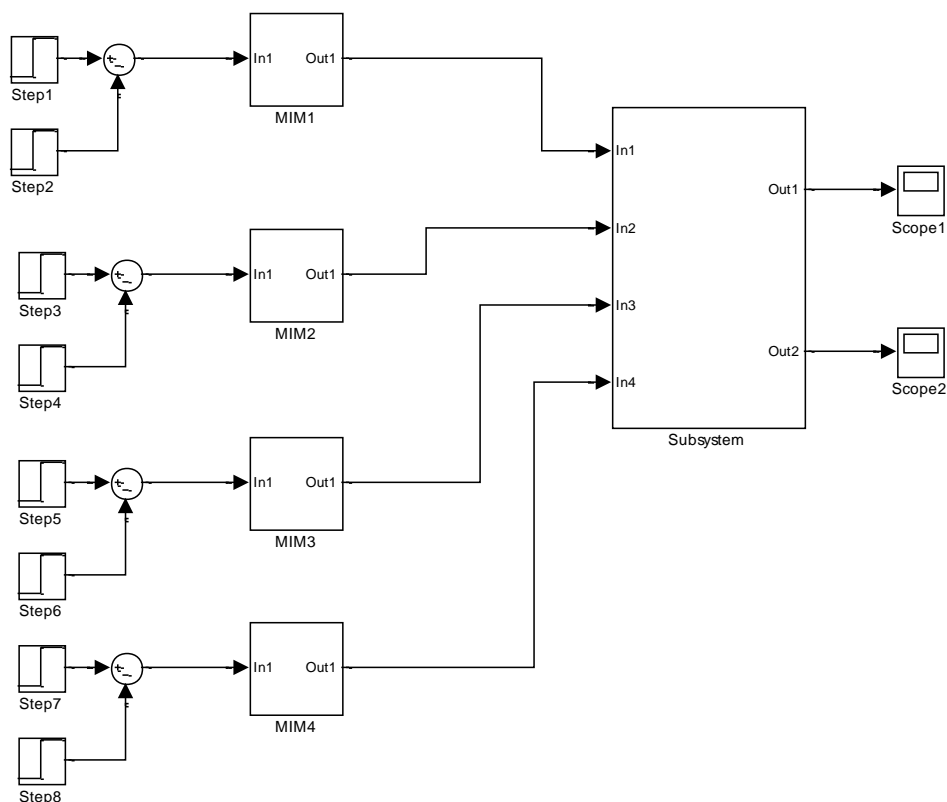


Рисунок 2.8 – Модель технологического процесса регулирования температуры и давления в автоклаве в виде подсистемы Simulink (Subsystem)

Таблица 2.3 – Входные и выходные параметры в подсистеме Subsystem

Обозначение порта	Описание порта	Передаваемый параметр	Размерность параметра
In1	Канал набора температуры	Сигнал управления регулирующим клапаном паровой магистрали	%
In2	Канал охлаждения	Сигнал управления регулирующим клапаном магистрали подачи холодной воды	%
In3	Канал сброса давления	Сигнал управления регулирующим клапаном магистрали слива паровоздушной смеси из автоклава	%
In4	Канал подачи давления	Сигнал управления регулирующим клапаном магистрали подачи сжатого воздуха	%
Out1	Канал измерение температуры	Температура воды в автоклаве	°С
Out2	Канал измерение давления	Давление в автоклаве	кПа

Для отражения полной модели технологического процесса регулирования температуры и давления в автоклаве с применением системы автоматического управления требуется учесть динамические свойства исполнительных механизмов, которыми в нашем случае являются мембранные исполнительные механизмы (МИМ) с электропневматическими позиционерами (ЭПП).

Звено, отражающее динамические свойства исполнительных устройств предлагается оформить так же в виде подсистемы (рисунок 2.9), и обозначим как МИМ1, МИМ2, МИМ3 и МИМ4.

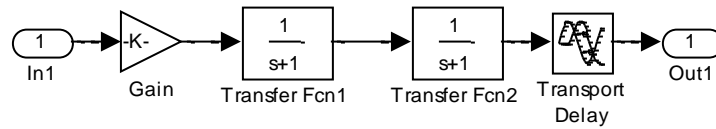


Рисунок 2.9 – Модель мембранного исполнительного механизма в виде подсистемы Simulink (МИМ)

В нашей модели исполнительные механизмы представлены последовательным соединением двух инерционных звеньев с единичным значением постоянной времени и коэффициента передачи, время чистого запаздывания составляет 0,1 с. В итоге исполнительный механизм будет иметь S-образную динамическую характеристику с зоной нечувствительности.

На динамику исполнительного механизма существенное влияние оказывают качество смазки в узлах трения, величина затяжки сальника регулирующего органа, и, кроме того, динамические свойства МИМ в процессе его эксплуатации могут довольно существенно меняться по причине сжимаемости воздуха.

Действительное время полного хода выходного органа исполнительного механизма равно времени, в течение которого выходной орган совершает перемещение, равное значению полного хода регулирующего органа.

2.3 Идентификация и проверка адекватности математической модели

Необходимость применения методов синтеза систем управления объясняется тем, что наряду с достижением высокого качества работы системы управления необходимо оптимальное распределение функций между ее программной и аппаратной частями с целью минимизации аппаратных затрат, в основном определяющих стоимость системы. Поэтому разработку алгоритма управления часто проводят с применением имитационного моделирования, которое актуально к применению в тех объектах, аналитическое описание которых затруднительно.

Выделяют системы имитационного моделирования трех типов [19]:

- первый тип опирается на использование реальной системы управления и физическую модель объекта;
- второй тип опирается на реальную систему управления и математическую модель объекта;
- третий тип опирается на модель системы управления и математическую модель объекта.

Очевидно, что на первом этапе проектирования наиболее эффективна имитационная модель третьего типа. Эффективность применения данной модели определяется следующими особенностями:

- отображение состояния системы управления и объекта в ходе процесса;
- масштабирование во времени, которое позволяет увеличить интенсивность исследований;
- гибкость, подразумевающая возможность изменения параметров системы управления и возмущающих воздействий при исследовании процессов, протекающих в модели.

Однако стоит отметить, что в системе имитационного моделирования третьего типа затруднительно учесть особенности работы системы управления в режиме реального времени, которые определяются техническими

характеристиками программно-аппаратной части системы, что обусловит необходимость дополнительной отладки системы управления на объекте автоматизации [58].

Одним из основных достаточно простых и доступных способов оценки имитационной модели является оценка её адекватности, при которой с помощью различных критериев проверяется соответствие между поведением модели и реального объекта. Цель её проведения - это убедиться, что модель ведет себя так, как задумано, сделать выводы на основе данных, полученных путем моделирования. Для этого необходимо располагать априорной информацией о свойствах и поведении объекта или его составных частей.

При оценке адекватности модели возникает необходимость в проведении экспериментальных производственных испытаний, что достаточно затруднительно. Кроме того, при оценке модели нужно учитывать, что у различных автоклавов различны конструкции исполнительных механизмов и даже у клапанов одного типа статические и динамические характеристики могут сильно отличаться. Уровни давления в магистралях подачи пара, воды и воздуха, а также температуры греющего пара и охлаждающей воды могут существенно меняться. Тепловая нагрузка автоклава изменчива из-за различных динамических свойств стерилизуемой продукции, степени загрузки аппарата, вида рабочей среды в стерилизаторе и её объема, зависящего от размера тары и способа укладки банок в корзины. Конструкции автоклавов так же разнообразны.

Данное обстоятельство имеет значение, поскольку разрабатываемую на базе автоклава Б6-КАВ-2 систему автоматического управления процессом стерилизации предполагается распространить на ряд подобных технологических объектов.

Для имитационной модели важным является функциональная полезность и достоверность [67]. Поэтому проверка разработанной модели будет осуществляться посредством моделирования некоторых элементарных процессов, воспроизведение которых возможно на объекте в производственных условиях с минимальными издержками. Экспериментально полученные

результаты будут сравниваться с результатами моделирования. При несовпадении результатов будет корректироваться как структура, так и параметры имитационной модели.

Экспериментальные данные были получены с автоклава марки Б6-КАВ-2 на пищекомбинате «Росинка» (г. Яранск, Кировская область). На представленных графиках данные, полученные экспериментально, отмечены символами точки «о». Результаты моделирования отображены сплошными линиями.

На рисунке 2.10 представлен график изменения температуры в автоклаве при подаче управляющих воздействий по каналу подачи пара и холодной воды для случая, когда в автоклав загружены 2 сетки, наполненные банками СКО ёмкостью 0,5 л (в эксперименте использовался брак). В эксперименте использовались консервы «Икра баклажанная». Количество банок в одной сетке 870 штук. Начальная температура банок с продуктом 70 °С. Начальная температура воды в автоклаве равна 75 °С. Температура корпуса автоклава и окружающей среды равна 25 °С. Давление в паровой магистрали и магистрали холодной воды в момент проведения эксперимента составляло 4 кПа.

Происходящее при этом увеличение и сброс давления в аппарате отражено на графике на рисунке 2.11.

Увеличение давления в аппарате при подаче сжатого воздуха, а также снижение давления при открытии сливного клапана от начального значения 4 кПа иллюстрируются графиком, представленным соответственно на рисунке 2.12. Давление сжатого воздуха в магистрали составляло 4 кПа.

Для обработки полученных данных в работе используются методы экспериментальных исследований [21].

Обозначим через A реальное значение технологического параметра (полученное путём снятия экспериментальной зависимости), а через a – его смоделированное значение.

Погрешностью (ошибкой) смоделированного параметра a называют разность между реальным значением технологического параметра A и его смоделированным значением a .

Для вычисления абсолютной погрешности используем формулу [74]:

$$\Delta a = |A - a|, \quad (2.13)$$

где Δa - модуль разности.

Относительная погрешность δa – это доля абсолютной погрешности, приходящаяся на единицу измеренной величины a :

$$\delta a = \frac{\Delta a}{|a|} \cdot 100\%, \quad (2.14)$$

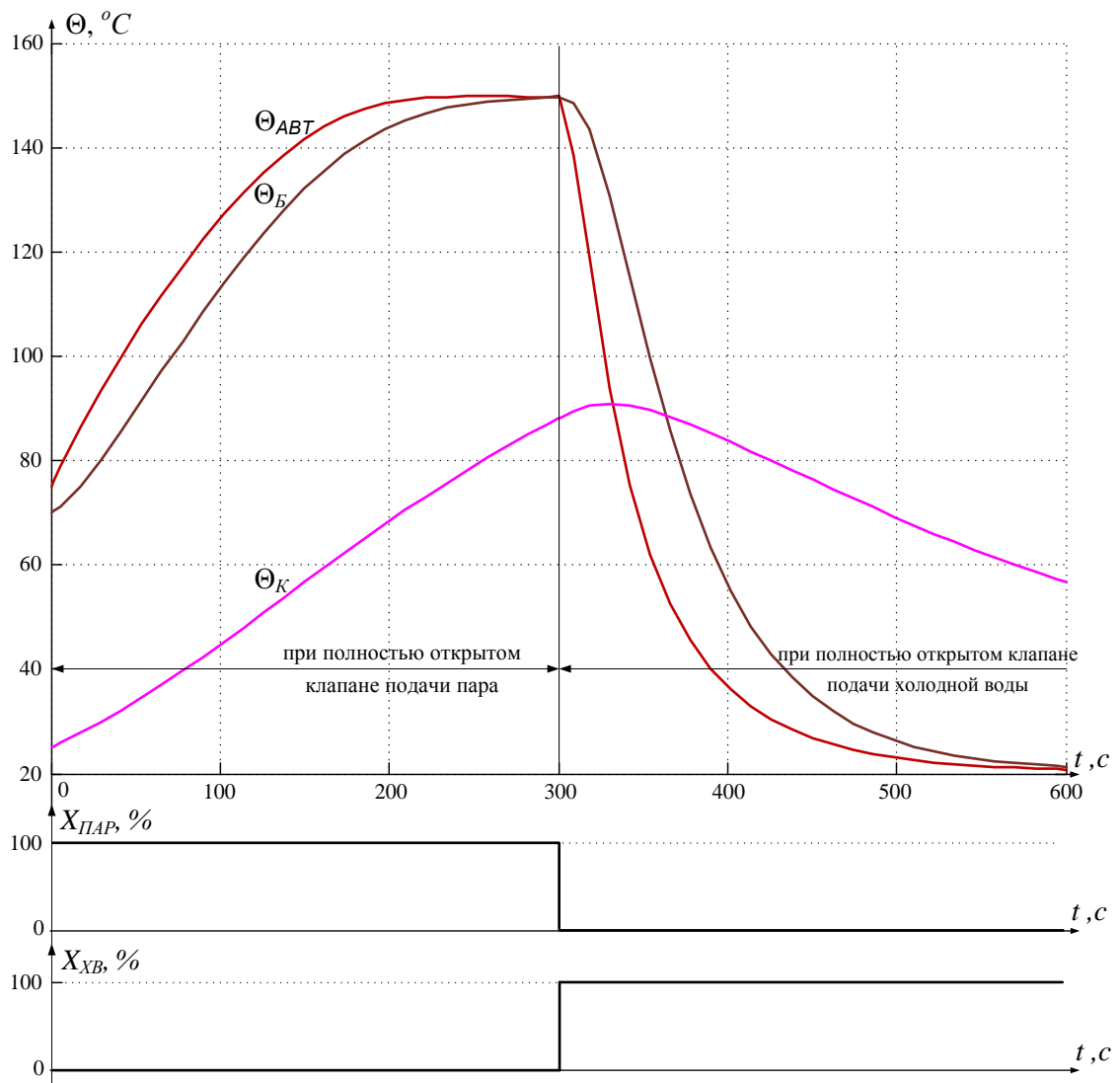


Рисунок 2.10 – График моделирования изменения температуры в среде Simulink в режиме нагрева и охлаждения автоклава

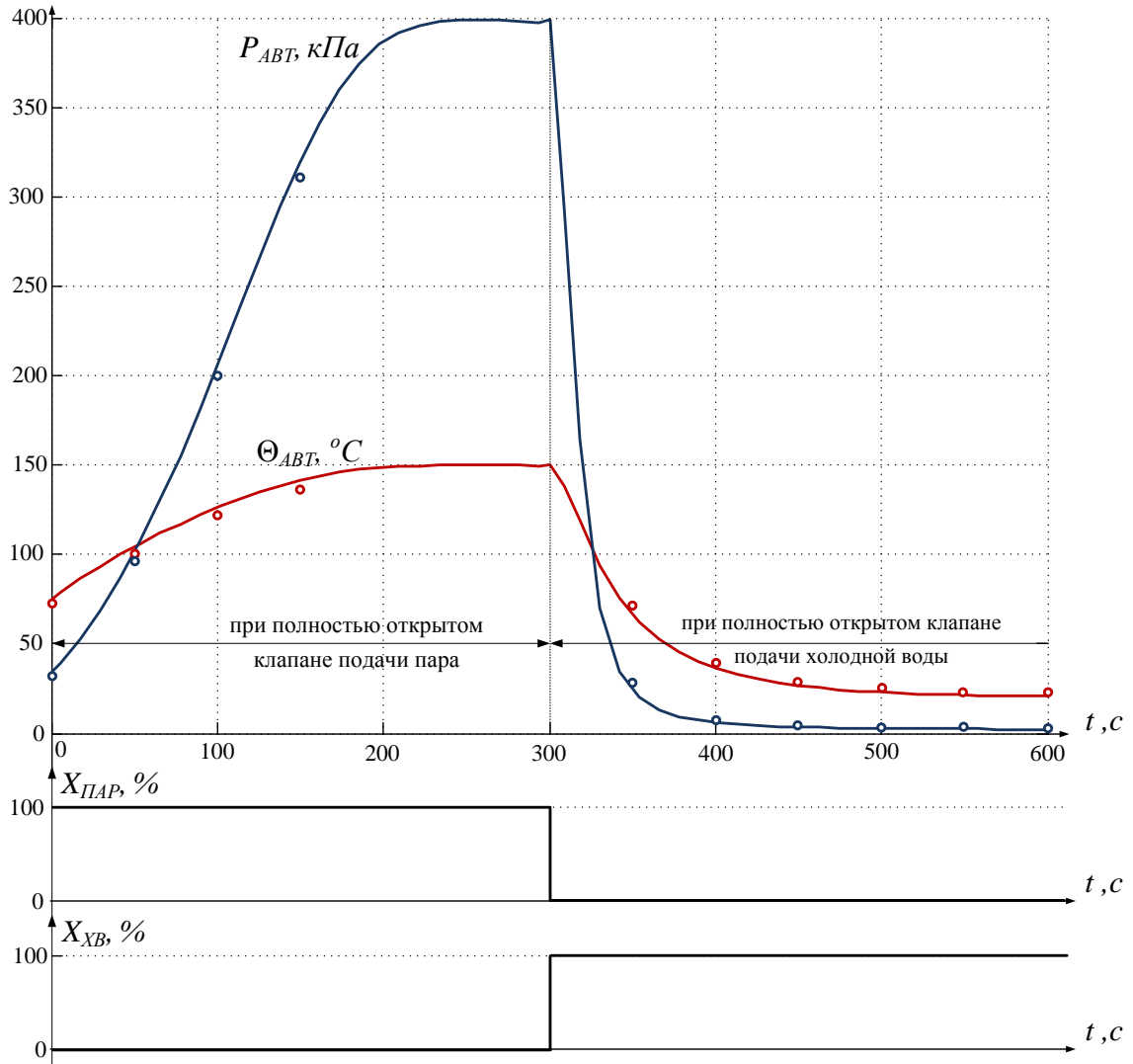


Рисунок 2.11 – График моделирования изменения температуры и давления в среде Simulink в режиме нагрева и охлаждения автоклава

Для проверки адекватности математической модели (рисунок 2.8) воспользуемся формулами (2.13) и (2.14). Для удобства анализа результаты измерений и погрешности сведём в таблицы Приложения Б. Данные графика нагрева и охлаждения автоклава (рисунок 2.11) сведём в таблицу Б.1. При этом данные по графику изменения давления в автоклаве (рисунок 2.11) сведём в таблицу Б.2. Данные графика при подаче и сбросе сжатого воздуха в автоклаве (рисунок 2.12) сведём в таблицу Б.3.

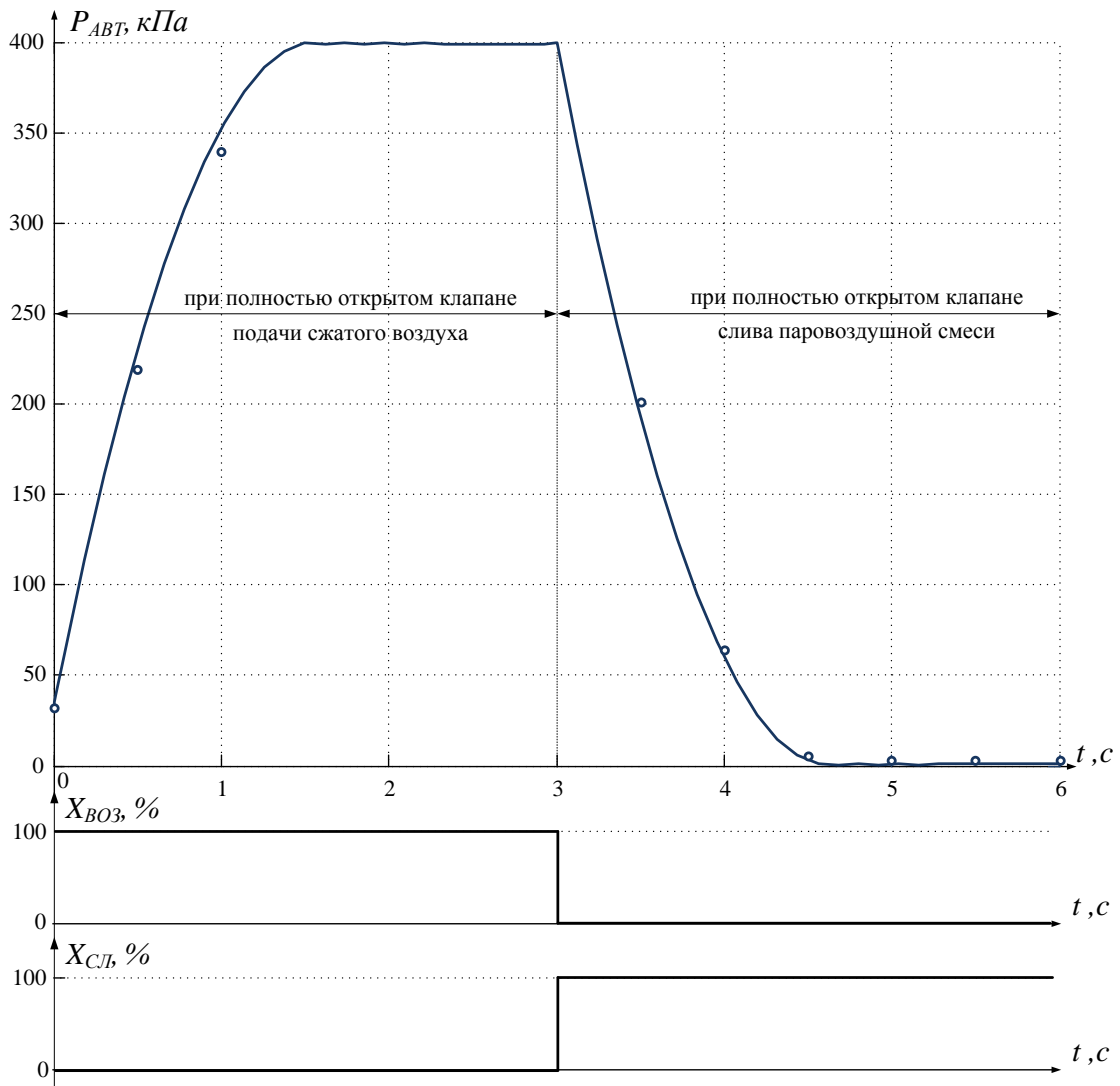


Рисунок 2.12 – График моделирования изменения давления в автоклаве в среде Simulink при подаче и сбросе сжатого воздуха

Как видно из представленных графиков (рисунок 2.11 и 2.12) и таблиц Приложения Б, данные, полученные экспериментально и с помощью моделирования, различаются не более, чем на 5%, что свидетельствует о пригодности имитационной модели для обозначенных целей.

В диссертации предложен аналитический метод получения математической модели автоклава, основанный на анализе физико-химических процессов, происходящих в объекте, с учётом его конструкции и характеристик перерабатываемых веществ.

Вместе с тем, аналитическая модель достаточно сложна, так как в реальном объекте одновременно происходят процессы трёх типов: физико-химические превращения, тепло- и массообмен. Одновременный учёт всех этих процессов – достаточно сложная задача.

Несмотря на сложности в реализации, у аналитической модели объекта существует ряд достоинств [33]:

1. Не требуется проведение промышленных экспериментов на объекте. Поэтому метод пригоден для нахождения модели объекта на стадии проектирования или при невозможности экспериментального исследования характеристик объекта регулирования.

2. В аналитическую модель входят конструктивные характеристики объекта и показатели технологического режима его функционирования. Поэтому такая модель может использоваться для выбора оптимальной конструкции аппарата и оптимизации его технологического режима.

3. Аналитическую модель можно использовать для исследований подобных объектов.

Итак, в работе найдено математическое описание, адекватно описывающее технологический процесс стерилизации консервов в автоклаве. С его помощью по полученным в ходе моделирования временным зависимостям можно производить оценку динамических характеристик технологического процесса стерилизации консервов.

Выводы по второй главе

1. Разработана математическая модель процесса стерилизации консервов в промышленном автоклаве при паровой стерилизации в воде с противодействием, учитывающая взаимодействие параметров, отражающих поведение исследуемой системы. Предложенная математическая модель адекватно отражает течение реального технологического процесса. Модель процесса стерилизации консервов позволяет учесть теплофизические свойства стерилизуемой продукции, влияние

технологических возмущений в энергосистемах (паропроводах, водопроводах и воздухопроводах) и индивидуальных характеристик автоклава.

2. Созданы предпосылки к разработке эффективных стерилизационных установок для малых предприятий и крупных производств, а также совершенствования существующих стерилизационных аппаратов с использованием разработанной математической модели технологического процесса стерилизации консервов в промышленном автоклаве.

ГЛАВА 3. ВЫБОР СТРУКТУРЫ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМ ПРОЦЕССОМ СТЕРИЛИЗАЦИИ КОНСЕРВОВ В ПРОМЫШЛЕННОМ АВТОКЛАВЕ

3.1 Выбор структуры управляющих устройств

В структурном аспекте система автоматического управления (САУ) процессом стерилизации консервов представлена взаимосвязанной совокупностью объекта управления (автоклава) и управляющего устройства (двухконтурного четырёхканального регулятора), воздействие которого приводит к выполнению поставленной цели (рисунок 3.1).

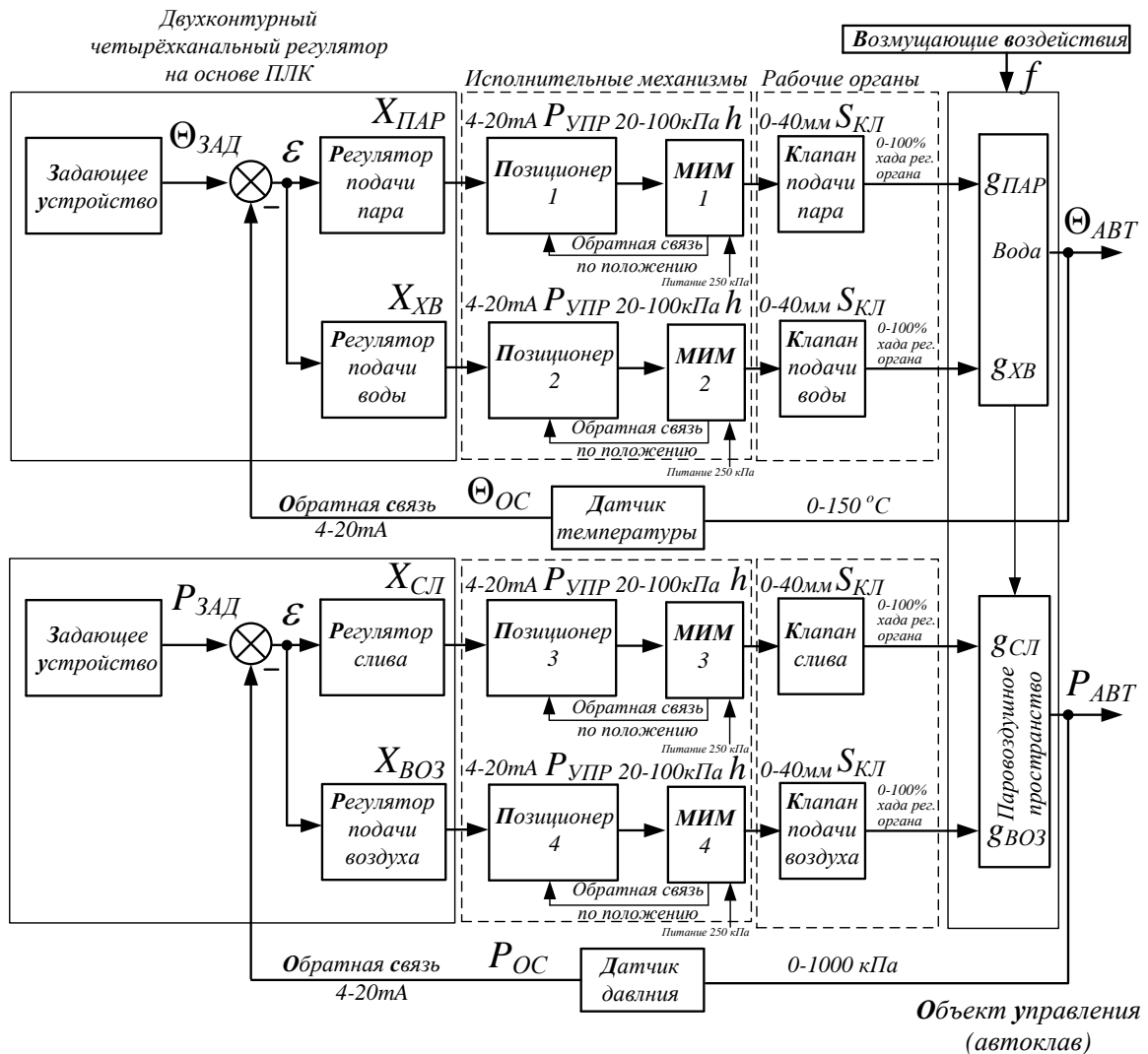


Рисунок 3.1 - Структурная схема системы автоматического управления технологическим процессом стерилизации консервов в промышленном автоклаве

На рисунке 3.1 автоклав изображён схематически, в виде блока, и не отражает особенностей своей конструкции. Интерес представляет связь между воздействием на входе автоклава и его реакцией на выходе. Такой подход позволяет создать модель, состоящую из отдельных элементов системы управления, и имитировать их поведение, что значительно облегчит поиск эффективных методов управления.

В общем виде система (рисунок 3.1) состоит из объекта управления (автоклава), измерительных устройств (датчиков), задающих устройств, суммирующих устройств, устройства управления (регулятора), преобразующих устройств (позиционеров), мембранных исполнительных механизмов (МИМ) и регулирующих органов (клапанов). Кроме того, на объект управления могут действовать возмущающие воздействия f (изменение давления в трубопроводах теплоносителя, температура теплоносителя и т.д.).

Технологический процесс стерилизации консервов в автоклаве характеризуется физическими параметрами, которые необходимо изменять по определённому закону. Эти параметры называются управляемыми (величина $\Theta_{АВТ}$ и $P_{АВТ}$).

Устройством управления является двухконтурный четырёхканальный регулятор на основе ПЛК, который включает в себя комплекс устройств, присоединённых к автоклаву и обеспечивающих автоматическое изменение управляемой величины по заданному закону. Задающее устройство оказывает управляющее воздействие (величина $\Theta_{Зад}$ и $P_{Зад}$) на вход системы. Воздействие выхода системы управления (величина $\Theta_{Ос}$ и $P_{Ос}$) на её вход является обратной связью. Введение обратной связи позволит управлять автоклавом при изменении его параметров во время технологического процесса. Кроме того замкнутая система управления с отрицательной обратной связью, обеспечивает достижение заданных целей управления при большой неопределённости возмущающих воздействий и изменений во времени структуры и параметров системы за счёт

уменьшения чувствительности к этим возмущающим воздействиям, вариациям структуры и параметров.

Принцип управления по отклонению является гибким, так как система получает информацию об управляемой величине через контур обратной связи и передаёт её в устройство управления, которое стремится скомпенсировать возникшее отклонение, тем самым учитывается состояние объекта управления. Такая система автоматического управления (рисунок 3.1) позволяет получить высокое качество управления, используя одновременно информацию о задающем воздействии и управляемой величине. Измеренная управляемая величина сравнивается с заданным значением и при наличии сигнала рассогласования ε , вырабатывается управляющее воздействие X , направленное в сторону компенсации сигнала рассогласования [38]. Недостатком принципа является затруднённая разработка быстродействующих систем автоматического управления, особенно для сложных инерционных объектов управления. Стремление увеличить точность работы системы может привести к потере устойчивости. Поскольку в рассматриваемом объекте управления можно выделить несколько простых контуров регулирования, предлагается применить данный принцип при разработке системы автоматического регулирования температуры и давления в автоклаве.

Как было показано на рисунке 2.2 и рисунке 2.3, структура системы управления автоклава должна иметь четыре независимых управляющих устройства (регулятора), каждое из которых управляет своим каналом управления. В автоклаве, как объекте управления, задействованы четыре канала: подача пара и холодной воды, подача воздуха и слив (сброс давления). Структурная схема системы автоматического управления технологическим процессом стерилизации консервов в промышленном автоклаве показана на рисунке 3.2.

Отличительной особенностью системы автоматического управления технологическим процессом стерилизации консервов является наличие в ней двух программных задающих устройств, которые формируют траекторию изменения

регулируемых параметров: заданной температуры воды $\Theta_{\text{ЗAD}}$ и давления $P_{\text{ЗAD}}$ в автоклаве. Задающее устройство должно реализовывать выполнение формулы стерилизации консервов (1.1) и тем самым сформировать необходимый график изменения параметров технологического процесса (рисунок 1.2).

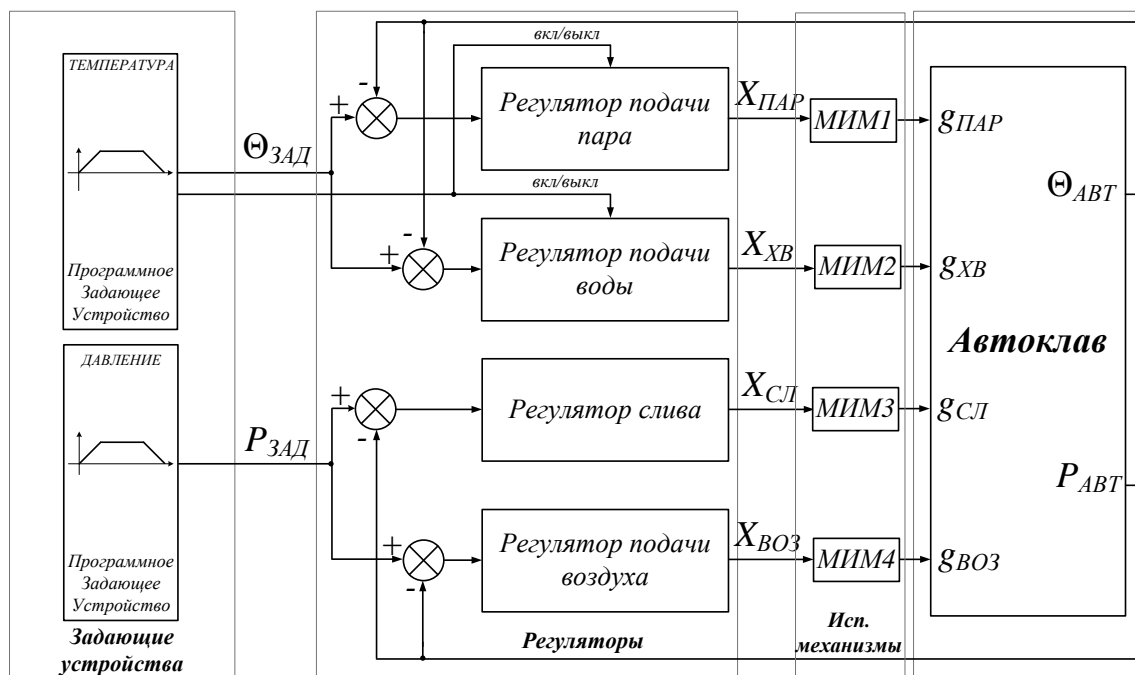


Рисунок 3.2 - Схема модели системы автоматического управления технологическим процессом стерилизации консервов

По технологии работы аппаратов для стерилизации, канал подачи пара и холодной воды в автоклаве должны работать в разные (взаимоисключающие) промежутки технологического цикла. Канал подачи пара работает в период нагревания теплоносителя и стерилизации консервов, а канал подачи воды работает в период охлаждения продукта. Для этого у программного задающего температуру устройства предусмотрен ещё один выходной канал, сигнализирующий об окончании периодов нагревания и стерилизации и к переходу в режим охлаждения. Этот сигнал является разрешающим для включения в работу требуемого регулятора в зависимости от стадии процесса.

Проведём анализ эффективности предлагаемой системы управления на примере формулы стерилизации консервы «Икра баклажанная» в стеклянной таре СКО I-82-500 [4,11]:

$$\frac{A-B-C}{\Theta_{СТ}} P_{СТ} = \frac{25-50-25}{120} 250. \quad (3.1)$$

Буквенные обозначения на графике стерилизации (рисунок 3.3), согласно формулы стерилизации консервов «Икра баклажанная»: $A = 25$ – время нагревания теплоносителя в автоклаве от начальной температуры до заданной (период нагревания), мин; $B = 50$ – время выдержки при заданной температуре (стерилизация), мин; $C = 25$ – время снижения температуры и давления до уровня, позволяющего производить разгрузку (период охлаждения), мин; $\Theta_{СТ} = 120$ – температура стерилизации, °С; $P_{СТ} = 250$ – противодавление, создаваемое в автоклаве для компенсации внутреннего давления, возникающего в банке при стерилизации, кПа.

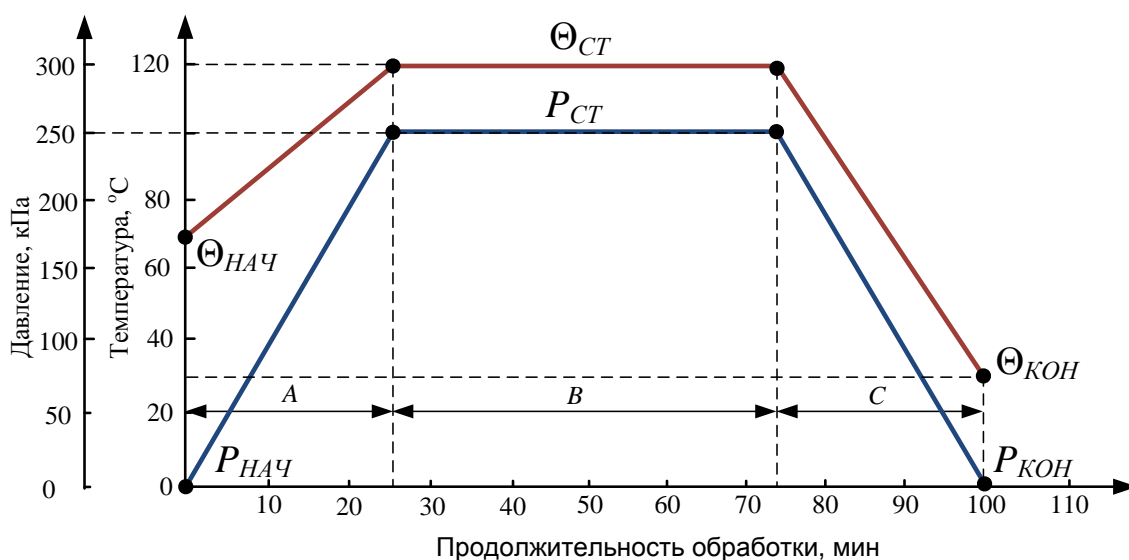


Рисунок 3.3 - Графики заданного регулирования температуры воды и давления в процессе стерилизации

Порядок изменения температуры воды и давления в процессе стерилизации приведён на рисунке 3.4.

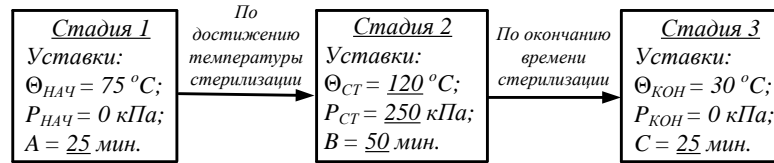


Рисунок 3.4 - Алгоритм изменения температуры воды и давления в процессе стерилизации консервы «Икра баклажанная»

Начальная температура воды в автоклаве $\Theta_{НАЧ} = 75 \text{ }^\circ\text{C}$ задаётся исходя из температуры загруженного в банки продукта. Для выравнивания начальных температур греющей воды и банок последние выдерживаются некоторое время в подогретой воде. Конечную температуру воды $\Theta_{КОН}$ в автоклаве задают чаще всего на уровне 30 - 40 $^\circ\text{C}$. Начальное $P_{НАЧ}$ и конечное $P_{КОН}$ давления равны 0 кПа.

Структурные схемы программного задающего устройства температуры и давления системы автоматического управления технологическим процессом стерилизации консервов в промышленном автоклаве в виде подсистем Simulink приведены на рисунке 3.5 и 3.6. Описание портов подсистем сведено в таблицы 3.1 и 3.2.

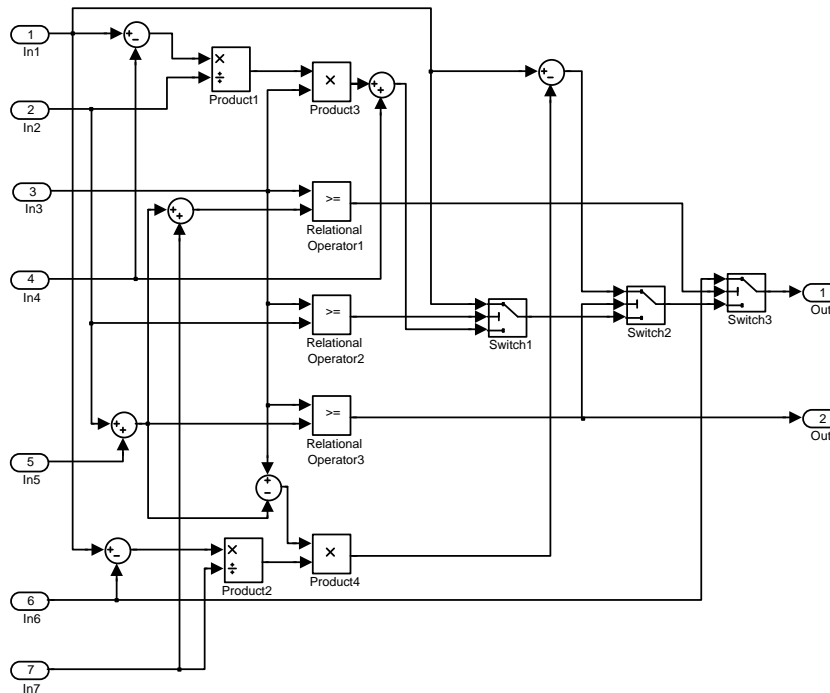


Рисунок 3.5 - Схема программного задающего устройства температуры в виде подсистемы Simulink (Subsystem2)

Таблица 3.1 – Входные и выходные параметры в подсистеме (рисунок 3.5)

Обозначение порта	Обозначение параметра	Описание параметра	Размерность параметра
In1	Θ_{CT}	Температура стерилизации	$^{\circ}\text{C}$
In2	A	Время нагрева	с
In3	$Clock$	Текущее время моделирования	с
In4	$\Theta_{НАЧ}$	Начальная температура воды	$^{\circ}\text{C}$
In5	B	Время стерилизации	с
In6	$\Theta_{КОН}$	Конечная температура воды	$^{\circ}\text{C}$
In7	C	Время охлаждения	с
Out1	$\Theta_{ЗАД}$	Заданная температура воды	$^{\circ}\text{C}$
Out2	вкл./выкл.	Разрешающий сигнал	TRUE/FALSE

При создании модели подсистемы в Simulink были использованы блоки математических операций умножения и деления Product, блоки вычисления операций отношения Relational Operator (в частности операция больше или равно), а так же блоки переключателя Switch [84].

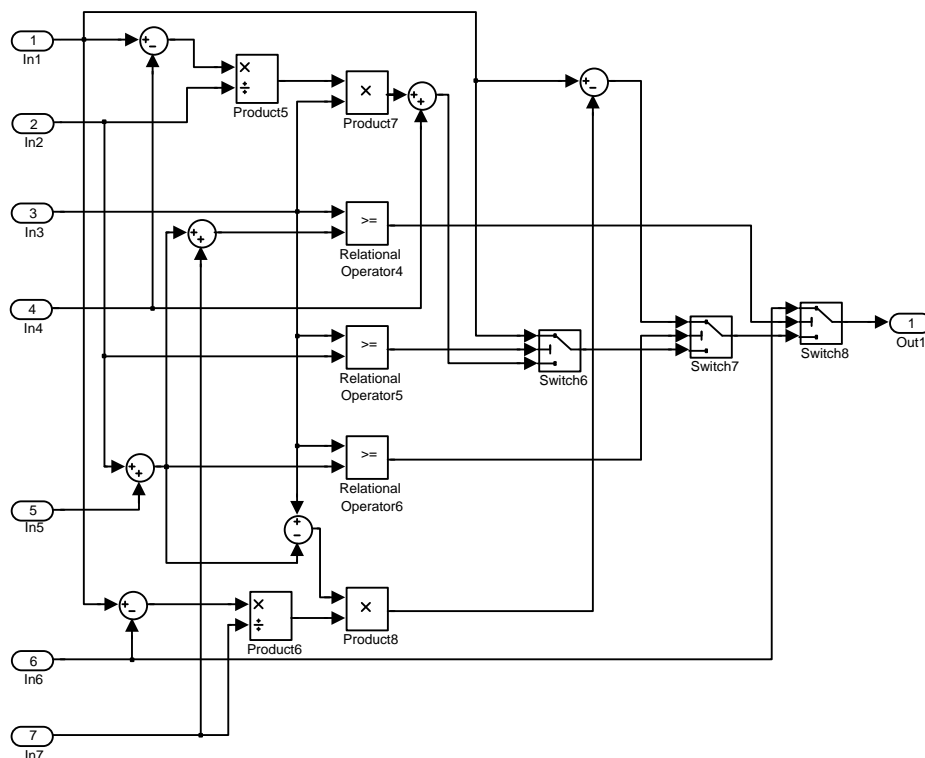


Рисунок 3.6 - Схема программного задающего устройства давления в виде подсистемы Simulink (Subsystem3)

Таблица 3.2 – Входные и выходные параметры в подсистеме (рисунок 3.6)

Обозначение порта	Обозначение параметра	Описание параметра	Размерность параметра
In1	$P_{СТ}$	Давление при стерилизации	кПа
In2	A	Время набора давления	с
In3	$Clock$	Текущее время моделирования	с
In4	$P_{НАЧ}$	Начальное давление	кПа
In5	B	Время поддержания давления при стерилизации	с
In6	$P_{КОН}$	Конечное давление	кПа
In7	C	Время сброса давления	с
Out1	$P_{ЗАД}$	Заданное давление в автоклаве	кПа

Задачей синтеза системы автоматического управления (рисунок 3.2) является выбор структуры и параметров системы автоматического управления, которые в соответствии с заданными техническими условиями обеспечивают наиболее рациональные характеристики объекта управления по показателям качества процесса регулирования. Качественное управление осуществляется с помощью введения в каждый канал регулирования специальных корректирующих звеньев (регуляторов) с особо подобранной передаточной функцией по известным параметрам остальных звеньев системы.

При реализации систем автоматического управления используется множество различных типов корректирующих устройств с различной структурой, однако в теории автоматического управления из них особо выделяют типовые звенья, которые называются регуляторами [25]. Автоматические регуляторы классифицируются по назначению, конструктивным особенностям, принципу действия, характеру изменения регулирующего воздействия, виду используемой энергии и т.п. По виду выполняемых функций типовые регуляторы подразделяются на регуляторы автоматической стабилизации, корректирующие, программные, регуляторы соотношения параметров и другие. В системе автоматического управления процессом стерилизации рассматриваются два программных регулятора: регулятор температуры и регулятор давления.

Алгоритм регулирования иначе называют законом регулирования. По закону регулирования регуляторы делятся на двух- и трехпозиционные регуляторы, непрерывные регуляторы (интегральные, пропорциональные, пропорционально-дифференциальные, пропорционально-интегральные и пропорционально-интегрально-дифференциальные регуляторы — сокращенно И, П, ПД, ПИ и ПИД-регуляторы), регуляторы с переменной структурой, адаптивные (самонастраивающиеся) и оптимальные регуляторы [14,57].

3.2 Оценка влияния свойств объекта на выбор закона регулирования

Выбор типа регулятора зависит от комплекса показателей, обеспечивающих формирование технологического процесса с заданной точностью. Достижение требуемого результата может быть обеспечено как за счет применения простейших двухпозиционных релейных регуляторов, так и за счет более сложных решений.

Двухпозиционные регуляторы нашли широкое распространение благодаря своей простоте и малой стоимости. Считается, что возможность дискретного управления процессом стерилизации позволяет значительно упростить аппаратную часть системы автоматике. В связи с этим прорабатывался вопрос о разработке регулятора, осуществляющего дискретное управление исполнительными механизмами [19].

Заметим, что по требованиям технологического регламента многие объекты не допускают применения релейного управляющего воздействия. В результате экспериментальных исследований на производстве определено, что дискретное управление процессом стерилизации с применением арматуры дискретного принципа действия для регулирования технологических параметров не целесообразно и не позволяет добиться заданного качества регулирования, а также приводит к сильным вибрациям в трубопроводах подачи теплоносителей. Было выявлено, что качество работы позиционного регулятора в автоклаве не удовлетворяет технологическим требованиям, так как система работает в

автоколебательном режиме, причем амплитуда автоколебаний при любых условиях превышала 2°C [44].

К настоящему времени практическая деятельность, направленная на автоматизацию производственных процессов, позволяет выделить сравнительно небольшое количество типовых линейных законов регулирования, которые по принципу действия классифицируют следующим образом.

Пропорциональные регуляторы [32]. Устойчиво работают на многих объектах регулирования, однако при различных возмущениях (нагрузках) регулируемая величина удерживается на различных значениях. Это явление получило название статической ошибки - отклонение регулируемой величины от задания. П - закон управления имеет наибольшее быстродействие. Однако, если коэффициент усиления П - регулятора мал (чаще всего это наблюдается в системах с запаздыванием), то регулятор не обеспечивает заданной точности регулирования, т.к. в этом случае довольно значительна величина статической ошибки. Чаще всего, если $K_p \geq 10$, то П-регулятор обеспечивает приемлемый результат, при $K_p < 10$ - требуется введение в закон управления интегральной составляющей.

Пропорционально-дифференцирующие регуляторы [6]. Данные регуляторы имеют наивысшее быстродействие. ПД - регулятор реагирует не только на величину отклонения, но, что наиболее важно, на скорость ее изменения. Недостатками ПД-регулятора являются малая точность и чувствительность к шумам.

Пропорционально-интегрирующие регуляторы [87]. В общем случае ПИ-регуляторы, отличаясь достаточно простой реализацией, позволяют устойчиво и без статической ошибки регулировать работу промышленных объектов. ПИ-регулятор, обладает следующими достоинствами:

1. При корректной настройке ошибка регулирования равна нулю.
2. Простота настройки, заключающаяся в подборе двух параметров: коэффициента усиления пропорциональной составляющей K_p и коэффициент усиления интегральной составляющей K_i . При этом возможно найти оптимальную

величину отношения $K_p/K_i \rightarrow \min$, чтобы обеспечить управление с минимально возможной среднеквадратичной ошибкой регулирования.

3. В отличие от ПИД-регулятора имеет малую чувствительность к шумам в канале измерения.

Пропорционально-интегро-дифференцирующие регуляторы [18]. ПИД-регулятор при правильной настройке обеспечивает наиболее высокое быстродействие в системе и качественное регулирование технологического процесса, но требует сложной процедуры настройки сразу трёх параметров и внимания при наладке и эксплуатации. Кроме того, из-за дифференциальной составляющей ПИД-регулятор обладает повышенной чувствительностью и наличие шумов в канале измерения приводит к значительным случайным колебаниям управляющего сигнала регулятора. Поэтому ПИД-регулятор следует выбирать для систем регулирования с относительно малым уровнем шумов и величиной запаздывания в объекте управления. Качество же работы ПИД-регулятора для систем с большим запаздыванием сравнимо с качеством работы ПИ-регулятора, поэтому ПИД-регуляторы нашли меньшее распространение в промышленности, чем ПИ-регуляторы.

Ввиду множества известных способов решения задач управления, от примитивных до исключительно сложных, выбор базового алгоритма работы промышленного регулятора является нетривиальной задачей. Поскольку общий критерий оптимальности для выбора регулятора отсутствует, автором предлагается разбить практический синтез САУ на ряд этапов, на каждом из которых будет решаться какая-то часть общей задачи синтеза:

1. Определение закона регулирования и типа регулятора (корректирующего устройства) в системе управления согласно требованиям к её точности, качеству управления, требованиям к надёжности, условиям работы относительно внешних воздействий и т.д.

2. Получение математического описания регулятора для заданного объекта управления, а также его коэффициентов настройки.

3. Нахождение наилучшего решения путём последовательного расчета нескольких вариантов управляющего устройства и его настройки, а затем в результате их сравнения при моделировании выявление оптимального варианта.

Существуют рекомендации по предварительному выбору закона регулирования и типа регулятора, исходя из величины отношения запаздывания τ к постоянной времени T объекта регулирования [37].

Если $\tau/T < 0,2$ – выбирается релейный, непрерывный или цифровой регуляторы.

Если $0,2 < \tau/T < 1$, то рекомендуется выбрать непрерывный или цифровой, ПИ-, ПД-, ПИД-регулятор.

Если $\tau/T > 1$, то выбирают специальный цифровой регулятор с упредителем, который компенсирует запаздывание в контуре управления. Однако этот же регулятор можно применять и при меньших отношениях τ/T .

В теории автоматического управления структура регулятора выбирается исходя из характеристик объекта управления. Более сложные регуляторы соответствуют более сложным объектам управления. Задача разработчика состоит в выборе такого типа регулятора, который обеспечивал бы заданное качество регулирования и надёжность при минимальных затратах ресурсов.

П – регулятор является достаточно быстродействующим, однако наличие статической ошибки является недостатком и требует оценки коридора отклонений относительно заданных требований. Такой регулятор, представляет собой идеальное усилительное звено (блок Gain), с коэффициентом усиления K_p (рисунок 3.7).

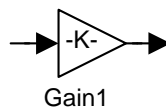


Рисунок 3.7 - Схема П-регулятора в пакете Simulink

Передаточная функция П-регулятора [14]:

$$W_n(p) = K_p, \quad (3.2)$$

Выход пропорционального регулятора определяется произведением ошибки рассогласования $\varepsilon(t)$ на коэффициент регулирования K_p :

$$X(t) = K_p \cdot \varepsilon(t). \quad (3.3)$$

Так как исследуемый объект регулирования не имеет существенного запаздывания (рисунок 2.11 и 2.12), то П – регулятор может обеспечить требуемую точность регулирования.

Приведенный выше типовой регулятор является идеальным, то есть не учитывающим инерционность его составляющих. Применение идеальных регуляторов в реальных САУ возможно, если постоянная времени применяемого регулятора достаточно мала, соответственно ей можно пренебречь.

Структурные схемы регуляторов температуры и давления системы автоматического управления технологическим процессом стерилизации консервов в промышленном автоклаве в виде подсистем Simulink приведены на рисунках с 3.8 по 3.11. Описание портов подсистем для удобства анализа системы сведено в таблицы с 3.3 по 3.6.

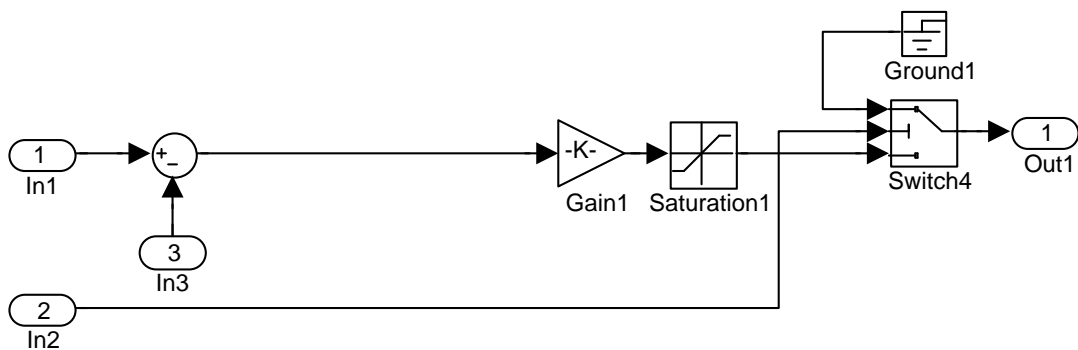


Рисунок 3.8 - Схема регулятора подачи пара в виде подсистемы Simulink (Subsystem4)

Таблица 3.3 – Входные и выходные параметры в подсистеме (рисунок 3.8)

Обозначение порта	Обозначение параметра	Описание параметра	Размерность параметра
In1	$\Theta_{ЗДЛ}$	Заданная температура воды в автоклаве	$^{\circ}\text{C}$
In2	<i>вкл./выкл.</i>	Разрешающий сигнал для регулятора	TRUE/FALSE
In3	$\Theta_{АВТ}$	Измеренная температура воды в автоклаве	$^{\circ}\text{C}$
Out1	$X_{ПАР}$	Сигнал управления регулирующим клапаном паровой магистрали	%

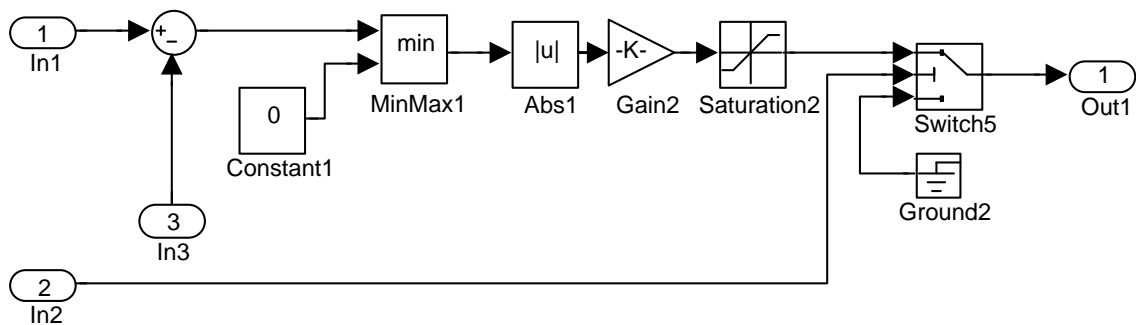


Рисунок 3.9 - Схема регулятора подачи воды в виде подсистемы Simulink (Subsystem5)

Таблица 3.4 – Входные и выходные параметры в подсистеме (рисунок 3.9)

Обозначение порта	Обозначение параметра	Описание параметра	Размерность параметра
In1	$\Theta_{ЗДЛ}$	Заданная температура воды в автоклаве	$^{\circ}\text{C}$
In2	<i>вкл./выкл.</i>	Разрешающий сигнал для регулятора	TRUE/FALSE
In3	$\Theta_{АВТ}$	Измеренная температура воды в автоклаве	$^{\circ}\text{C}$
Out1	$X_{ХВ}$	Сигнал управления регулирующим клапаном магистрали подачи холодной воды	%



Рисунок 3.10 - Схема регулятора подачи воздуха в виде подсистемы Simulink (Subsystem6)

Таблица 3.5 – Входные и выходные параметры в подсистеме (рисунок 3.10)

Обозначение порта	Обозначение параметра	Описание параметра	Размерность параметра
In1	$P_{ЗД}$	Заданное давление в автоклаве	кПа
In2	$P_{АВТ}$	Измеренное давление в автоклаве	кПа
Out1	$X_{ВОЗ}$	Сигнал управления регулирующим клапаном магистрали подачи сжатого воздуха	%

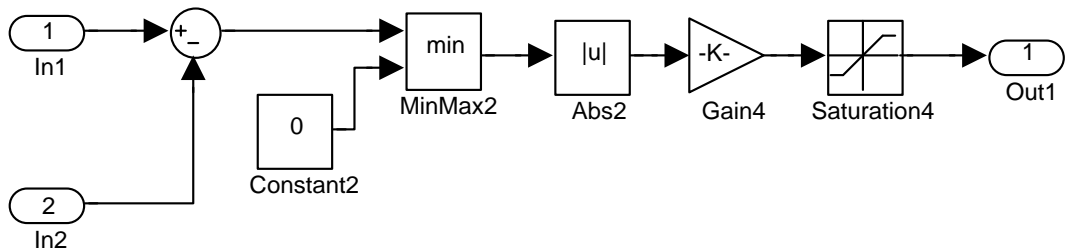


Рисунок 3.11 - Схема регулятора слива (сброса давления) в виде подсистемы Simulink (Subsystem7)

Таблица 3.6 – Входные и выходные параметры в подсистеме (рисунок 3.11)

Обозначение порта	Обозначение параметра	Описание параметра	Размерность параметра
In1	$P_{ЗД}$	Заданное давление в автоклаве	кПа
In2	$P_{АВТ}$	Измеренное давление в автоклаве	кПа
Out1	$X_{СЛ}$	Сигнал управления регулирующим клапаном магистрали слива паровоздушной смеси из автоклава	%

Для реализации моделей регуляторов в виде подсистем в Simulink были использованы блоки вычисления модуля Abs, определения минимального значения MinMax, ограничения Saturation, сигнала нулевого уровня Ground и источник постоянного сигнала Constant [84]. Блок усилителя Gain выступает в роли задания коэффициента усиления K_p для реализации П - регулятора.

3.3 Выбор метода расчёта коэффициентов настройки регуляторов

Следующим шагом при разработке системы регулирования является поиск оптимальных параметров настройки регулятора. Целью является подбор таких коэффициентов регулятора, чтобы все текущие отклонения регулируемой величины от заданного значения не превышали допустимые.

Под настройкой системы регулирования понимается перечень расчетных и экспериментальных работ, направленных на поиск настроечных коэффициентов регулятора, обеспечивающих заданное качество регулирования, организацию и проведение натурных испытаний на модели и реальном объекте или расчетных экспериментов для подтверждения оптимальности выбранных параметров. Параметрами настройки являются их численные значения для конкретного регулятора, ограничения на диапазоны их вариации при поиске, а также критерии качества [45,59,77].

Настройка параметров регулятора зависит от структуры системы управления, характеристик ее составных частей и решаемой задачи. Кроме того промышленный автоклав может иметь индивидуальные настройки регулятора для каждого этапа технологического процесса и вида стерилизуемой продукции [52].

Для настройки регуляторов можно использовать известные и широко применяемые методы теории автоматического управления. Существует довольно много методов [6,15,18,37], которые имеют преимущества в конкретных применениях: метод Циглера-Николса, метод CHR, метод Куна, метод частотной идентификации в замкнутом контуре, оптимальная настройка регуляторов по номограммам, экспериментальный метод настройки регулятора и др. Для типовых

П-, ПИ-, ПИД - регуляторов известны упрощенные аналитические и табличные методы настройки, которые менее трудоемки в сравнении с экспериментальными методами, такими как метод незатухающих колебаний Циглера-Николса, но дают при этом только приблизительные результаты и используются на начальных этапах проектирования систем управления. Затем полученные коэффициенты следует уточнять при помощи экспериментальных методов на математической (имитационной) модели и реальном объекте управления.

При настройке регуляторов, по мнению автора, наиболее эффективным является графоаналитический метод расчёта параметров по кривой разгона методом эмпирических формул А.П. Копеловича [20,38]. Метод основан на аппроксимации динамических процессов, происходящих в объекте управления, поэтому для определения оптимальных значений параметров регулятора потребуются знания переходной функции объекта регулирования.

Динамической характеристикой объекта управления называют изменение по времени выходной величины Y при заданных типовых изменениях входной величины X . В качестве типового входного воздействия удобнее всего применять ступенчатое изменение входного сигнала ΔX . Поэтому наибольшее распространение на практике получила кривая разгона (рисунок 3.12), т.е. динамическая характеристика, показывающая изменение во времени выходной величины объекта Y после ступенчатого изменения входной величины на ΔX . Для статического объекта переходный процесс на кривой разгона заканчивается при достижении выходной величиной нового установившегося значения $Y(\infty)$.

По разгонной характеристике (рисунок 3.12) определяются основные параметры объекта управления [20]: коэффициент передачи K , постоянная времени T и величина запаздывания τ .

Как говорилось ранее, разгонную характеристику исследуемого объекта удобнее обрабатывать графоаналитическим методом аппроксимации [45], так как ему характерна простота и достаточная для расчётов точность.

Коэффициент передачи объекта K [33]:

$$K = \frac{\Delta Y(\infty)}{\Delta X(\infty)}. \quad (3.4)$$

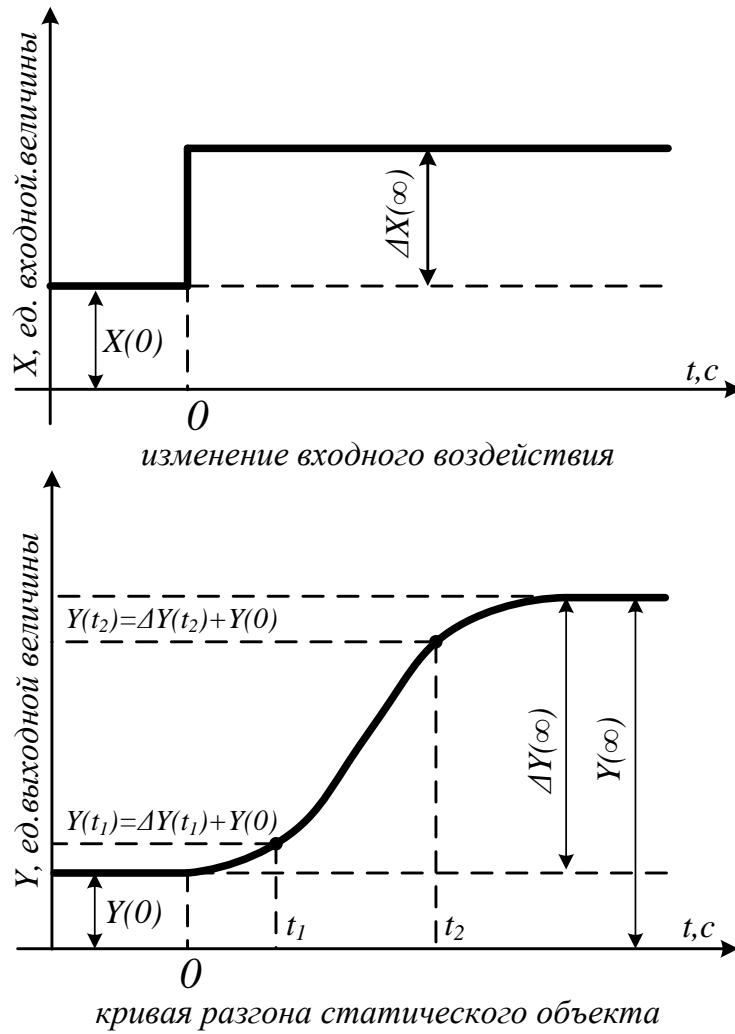


Рисунок 3.12 - Определение параметров объекта управления по кривым разгона

Постоянная времени T и величина запаздывания τ объекта [38]:

$$T = \frac{t_2 - t_1}{\ln \left(\frac{\Delta Y(\infty) - \Delta Y(t_1)}{\Delta Y(\infty) - \Delta Y(t_2)} \right)}. \quad (3.5)$$

$$\tau = T \cdot \ln \left(1 - \frac{\Delta Y(t_1)}{\Delta Y(\infty)} \right) + t_1 = T \cdot \ln \left(1 - \frac{\Delta Y(t_2)}{\Delta Y(\infty)} \right) + t_2, \quad (3.6)$$

Время t_1 и t_2 , соответствующее точкам $Y(t_1)$ и $Y(t_2)$ на кривой разгона (рисунок 3.12), которые в случае отсутствия явного перегиба графика следует определять по точкам на графике, рассчитанным по формулам [41]:

$$\Delta Y(t_1) \approx 0,1 \cdot \Delta Y(\infty), \quad (3.7)$$

$$\Delta Y(t_2) \approx 0,8 \cdot \Delta Y(\infty). \quad (3.8)$$

Для вычисления коэффициента усиления (K_p) П - регулятора воспользуемся эмпирической формулой [20]:

$$K_p = \frac{T}{K \cdot \tau}. \quad (3.9)$$

Процедуру расчёта коэффициентов настройки П - регуляторов по кривым разгона (рисунок 2.11 и 2.12) для четырёх каналов управления удобнее свести в таблицу 3.7 и 3.8.

Методом эмпирических формул А.П. Копеловича систему управления можно настроить на один из трёх оптимальных процессов регулирования: апериодический с минимальным временем регулирования, с двадцати процентным перерегулированием и с минимальным среднеквадратичным отклонением от задания. По формуле (3.9) система будет настроена на переходной процесс, обеспечивающий минимум интегрального критерия качества, то есть минимальное среднеквадратичное отклонение от задания. К достоинствам настройки на данный тип процесса можно отнести высокое быстродействие, но при этом может возникнуть колебательность процесса. Оптимизация этого критерия по параметрам настройки регулятора может быть выполнена аналитически, численно или путем моделирования.

Формулы предназначены для определения оптимальных настроек типовых регуляторов для характерных теплоэнергетических объектов, в данном случае

имеющих кривые разгона с самовыравниванием. Найденные при этом значения параметров регулятора принимаются как начальные для последующей оптимизации на имитационной модели при помощи экспериментально-итеративного метода наладки [6,20,38], так как расчёт параметров по формулам не может дать оптимальной настройки регулятора.

Величина отношения τ/T позволяет провести предварительную оценку правильности выбора типа регулятора [75]. Так как во всех каналах управления отношение $\tau/T < 0,2$ (таблицы 3.7 и 3.8), то для управления приемлем любой из рассмотренных регуляторов, включая выбранный П – регулятор.

Таблица 3.7 – Расчёт коэффициентов настройки П - регуляторов температуры по кривой разгона $\Theta_{ABT}(t)$ (рисунок 2.11)

Расчетный параметр	Значение	
	Канал подачи пара	Канал подачи холодной воды
$\Delta X(\infty), \%$	100	100
$Y(0), ^\circ\text{C}$	75	150
$Y(\infty), ^\circ\text{C}$	150	20
$\Delta Y(\infty), ^\circ\text{C}$	75	130
K	0,75	1,3
$\Delta Y(t_1), ^\circ\text{C}$	7,5	13
$\Delta Y(t_2), ^\circ\text{C}$	60	104
$Y(t_1), ^\circ\text{C}$	82,5	137
$Y(t_2), ^\circ\text{C}$	135	46
t_1, c	11,5	9,9
t_2, c	125	77,3
T	75,4	44,8
τ	3,5	5,2
τ/T	0,047	0,116
K_p	28,35	6,63

Таблица 3.8 – Расчёт коэффициентов настройки П - регуляторов давления по кривой разгона $P_{ABT}(t)$ (рисунок 2.15)

Расчетный параметр	Значение	
	Канал подачи сжатого воздуха	Канал слива (сброса давления)
$\Delta X(\infty), \%$	100	100
$Y(0), ^\circ\text{C}$	34	400
$Y(\infty), ^\circ\text{C}$	400	0
$\Delta Y(\infty), ^\circ\text{C}$	366	400
K	3,66	4
$\Delta Y(t_1), ^\circ\text{C}$	36,6	40
$\Delta Y(t_2), ^\circ\text{C}$	292,8	320
$Y(t_1), ^\circ\text{C}$	70,6	360
$Y(t_2), ^\circ\text{C}$	326,8	80
t_1, c	0,08	0,085
t_2, c	0,867	0,907
T	0,523	0,546
τ	0,025	0,027
τ/T	0,047	0,05
K_p	5,753	5,036

Так как схемы моделирования задающих устройств и регуляторов температуры и давления в Simulink достаточно сложны, предлагается представить эти устройства в виде подсистем Simulink (см. главу 2, рисунок 2.9). Модель системы автоматического управления технологическим процессом стерилизации консервов в промышленном автоклаве в виде подсистем Simulink приведена на рисунке 3.13. Назначение входных и выходных сигналов модели описаны в таблице 3.9.

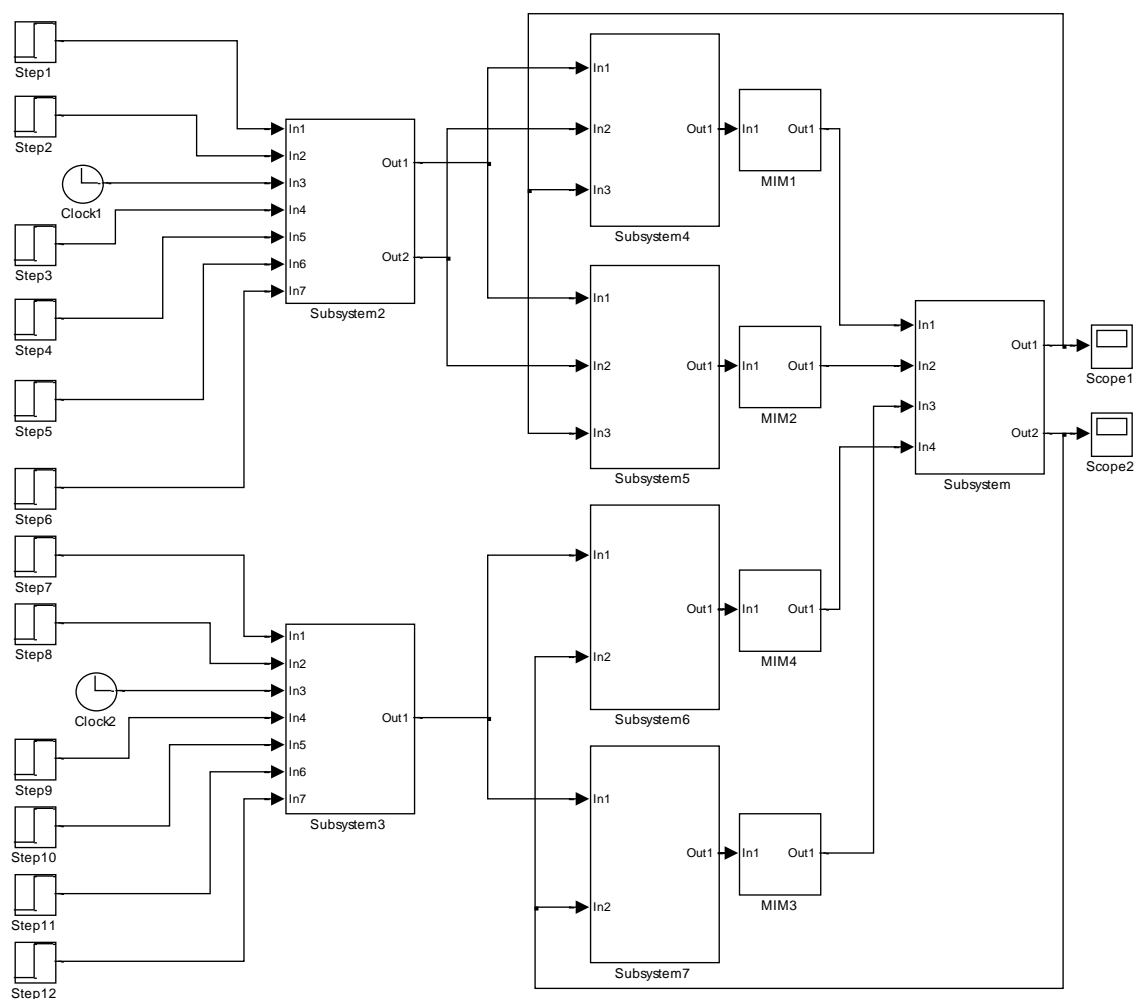


Рисунок 3.13 - Модель системы автоматического управления технологическим процессом стерилизации консервов в промышленном автоклаве в виде подсистем Simulink

Таблица 3.9 – Входные и выходные параметры в модели Simulink (рисунок 3.13)

Обозначение блока	Обозначение параметра	Описание параметра	Размерность параметра
Step1	Θ_{CT}	Температура стерилизации	$^{\circ}\text{C}$
Step2	A	Время нагрева	с
Clock1	Clock	Текущее время моделирования	с
Step3	$\Theta_{НАЧ}$	Начальная температура воды	$^{\circ}\text{C}$
Step4	B	Время стерилизации	с
Step5	$\Theta_{КОН}$	Конечная температура воды	$^{\circ}\text{C}$
Step6	C	Время охлаждения	с
Step7	P_{CT}	Давление при стерилизации	кПа
Step8	A	Время набора давления	с

Обозначение блока	Обозначение параметра	Описание параметра	Размерность параметра
<i>Clock2</i>	<i>Clock</i>	Текущее время моделирования	с
Step9	$P_{НАЧ}$	Начальное давление	кПа
Step10	B	Время поддержания давления в режиме стерилизации	с
Step11	$P_{КОН}$	Конечное давление	кПа
Step12	C	Время сброса давления	с
Scope1	$\Theta_{АВТ}$	Измеренная температура воды в автоклаве	°С
Scope2	$P_{АВТ}$	Измеренное полное давление в автоклаве	кПа

Традиционным вариантами проверки правильности определения свойств систем автоматического управления в процессе синтеза являются аналитические методы, опирающиеся на косвенные показатели (интегральные оценки, корневой годограф, частотные характеристики), которые позволяют оценивать влияние изменения параметров замкнутой системы на ее показатели качества по передаточной функции замкнутой системы или по частотным характеристикам разомкнутой системы. В настоящее время, за счет применения современных средств имитационного моделирования [42], прежде всего системы MATLAB и пакета Simulink, получить прямые показатели качества гораздо проще, чем косвенные, к тому же, прямые показатели качества более точно определяют свойства системы [87].

Предлагается проверить работоспособность разработанной системы автоматического управления технологическим процессом стерилизации консервов в промышленном автоклаве по графикам регулирования температуры воды и давления в процессе стерилизации (рисунок 3.14) полученных на базе имитационной модели в пакете Simulink (рисунок 3.13).

Как видно из графиков, П - закон управления в целом обеспечивает высокое быстродействие и хорошую точность. Однако в режиме охлаждения в работе регулятора температуры наблюдается недопустимое отклонение от задания, для

устранения которого необходимо введение в закон управления интегральной составляющей.

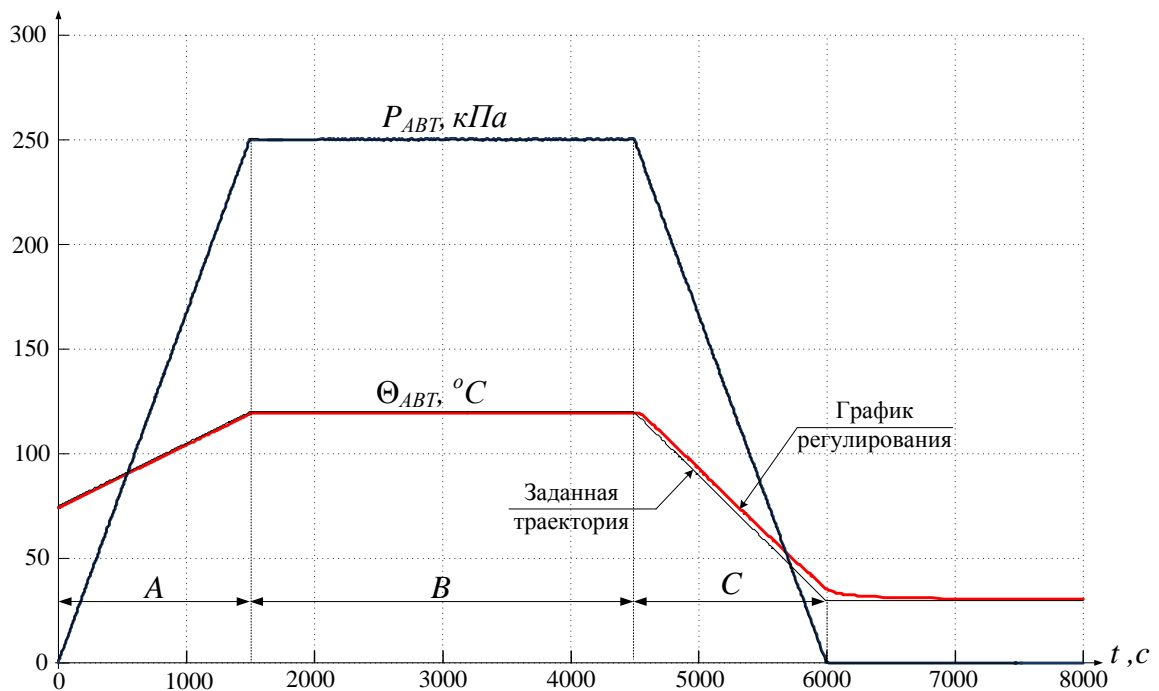


Рисунок 3.14 – Графики регулирования температуры и давления в процессе стерилизации при использовании П - регуляторов температуры и давления

3.4 Анализ качества процесса регулирования

Для более точной оценки правильности выбора структуры и параметров спроектированной системы проведём определение по графикам моделирования прямых показателей качества и точности процесса регулирования. Из прямых показателей качества наиболее часто используют следующие (рисунок 3.15)[7]:

- статическая ошибка регулирования - $\varepsilon_{ст}$;
- время регулирования - t_p ;
- перерегулирование - σ ;
- показатель колебательности - M .

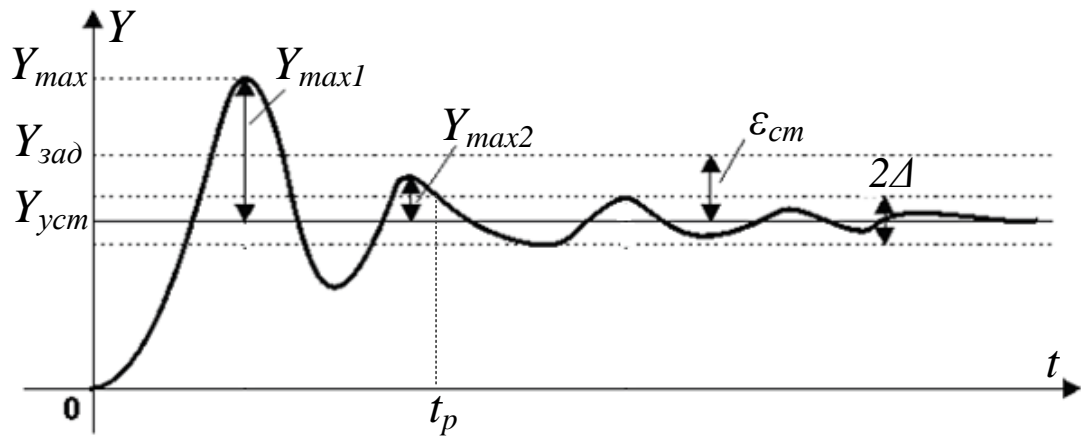


Рисунок 3.15 – Определение прямых показателей качества по переходной характеристике

Отклонение управляемой величины от установившегося значения – Δ , принимается равным 5%.

Перерегулирование определяется по формуле:

$$\sigma = \frac{Y_{\max} - Y_{уст}}{Y_{уст}} \cdot 100\%, \quad (3.10)$$

где Y_{\max} – максимальное значение выходного сигнала;

$Y_{уст}$ – установившееся значение выходного сигнала.

Перерегулирование является величиной относительной и хорошо характеризует заброс регулируемой величины. По общим требованиям к системам автоматического управления, перерегулирование не должно превышать 20%.

Статическая ошибка регулирования (статическая точность) системы ($\epsilon_{ст}$) показывает на сколько отличается уровень выходного сигнала от заданного его значения:

$$\epsilon_{ст} = Y_{уст} - Y_{зад}, \quad (3.11)$$

где $Y_{\text{зад}}$ – заданное значение выходного сигнала.

Показатель колебательности (M) показывает вид переходного процесса и оценивает его колебательность, которая оценивается отношением соседних максимумов:

$$M = \frac{Y_{\text{max1}}}{Y_{\text{max2}}} \cdot 100\%, \quad (3.12)$$

где Y_{max1} – значение первого пика переходной характеристики;
 Y_{max2} – значение второго пика переходной характеристики.

В случае, если показатель колебательности $M = 1$ – переходный процесс апериодический; если $M > 1$ – колебательный сходящийся, если $M < 1$, то имеет место расходящийся колебательный процесс. Чем показатель колебательности больше единицы, тем переходный процесс более колебательный.

Прямые показатели качества процесса регулирования определяются непосредственно по графику переходной характеристики (рисунок 3.14), которые занесены в таблицу 3.10.

По полученным показателям качества процесса регулирования из таблицы 3.10 можно сделать вывод, что процесс регулирования температуры и давления не колебательный ($\sigma=0$ и $M=0$) и не затянутый, так как время регулирования каждой фазы процесса совпадает с заданным в формуле стерилизации (3.1) временем. Статическая же ошибка $\varepsilon_{ст}$ процесса регулирования не равна нулю и отличается по своему значению на различных стадиях процесса стерилизации.

Таблица 3.10 – Показатели качества процесса регулирования (рисунок 3.14)

Показатели качества	Значение		
	период нагрева	период стерилизации	период охлаждения
Регулирование температуры Θ_{ABT}			
$t_p, \text{сек}$	1500	3000	1500
$\sigma, \%$	0	0	0
$\varepsilon_{cm}, ^\circ\text{C}$	1	0,2	3
M	0	0	0
Регулирование давления P_{ABT}			
$t_p, \text{сек}$	1500	3000	1500
$\sigma, \%$	0	0	0
$\varepsilon_{cm}, \text{кПа}$	0,3	0,1	0,25
M	0	0	0

Существуют основные критерии, которым по технологии должен соответствовать график регулирования процесса стерилизации консервной продукции:

- точность ведения процесса по температуре Θ_{ABT} :
 $\varepsilon_{cm} = \pm 0,01 \cdot \Theta_{CT} = \pm 0,01 \cdot 120^\circ\text{C} = 1,2^\circ\text{C}$;
- поддержание противодействия P_{ABT} изменению давления в банке с точностью: $\varepsilon_{cm} = \pm 0,01 \cdot P_{CT} = \pm 0,01 \cdot 250 \text{кПа} = 2,5 \text{кПа}$;
- точность по времени $\pm 1 \text{мин}$.

Как видно из таблицы 3.10, на стадии охлаждения ошибка регулирования по температуре Θ_{ABT} превышает допустимое значение на $1,8^\circ\text{C}$. Что является не допустимым для технологического процесса стерилизации консервов.

Известно, что чем больше время полного запаздывания τ - тем труднее регулировать такой процесс. Как видно из таблицы 3.7 и 3.8 наибольшим запаздыванием обладают каналы управления, в которых регулируется температура, а наименьшим – каналы управления, в которых поддерживается давление.

Для быстрых процессов регулирования, таких как регулирование давления, с резкими изменениями параметров важна дифференциальная компонента. Для

процессов с плавным изменением параметров, таких как регулирование температуры, важнее интегральная компонента.

В частности, как показывают исследования, в рассматриваемом автоклаве контур регулирования давления, построенный на П-регуляторах, полностью устраивает по качеству. Контур регулирования температуры позволит исключить ошибку регулирования $\varepsilon_{ст}$ только при использовании в каналах управления температурой ПИ-регуляторов.

ПИ - регулятор в пакете Simulink представляет собой параллельное соединение идеального усилительного звена (блок Gain) и последовательно соединенных идеального усилительного и интегрирующего (блок Integrator) звеньев (рисунок 3.16).

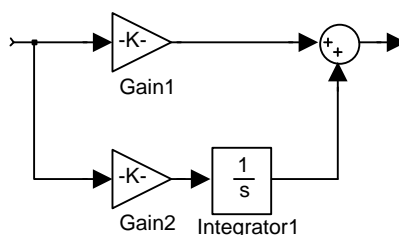


Рисунок 3.16 - Схема ПИ-регулятора в пакете Simulink

Передаточная функция ПИ-регулятора с независимыми настройками [14]:

$$W_{ПИ}(p) = K_p \pm \frac{K_i}{p}, \quad (3.13)$$

где K_p – коэффициент усиления пропорциональной составляющей регулятора;

K_i – коэффициент усиления интегральной составляющей регулятора.

Выход пропорционального регулятора определяется произведением ошибки рассогласования $\varepsilon(t)$ на коэффициент регулирования K_p и интеграла от ошибки на коэффициент усиления интегральной составляющей K_i :

$$X(t) = K_p \cdot \varepsilon(t) + K_i \cdot \int_0^t \varepsilon(t) dt. \quad (3.14)$$

Структурные схемы ПИ-регуляторов температуры системы автоматического управления технологическим процессом стерилизации консервов в промышленном автоклаве в виде подсистем Simulink приведены на рисунке 3.17 и 3.18.

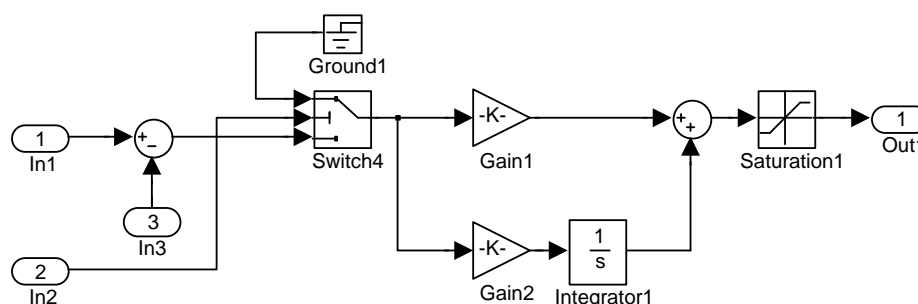


Рисунок 3.17 - Схема ПИ-регулятора подачи пара в виде подсистемы Simulink (Subsystem4)

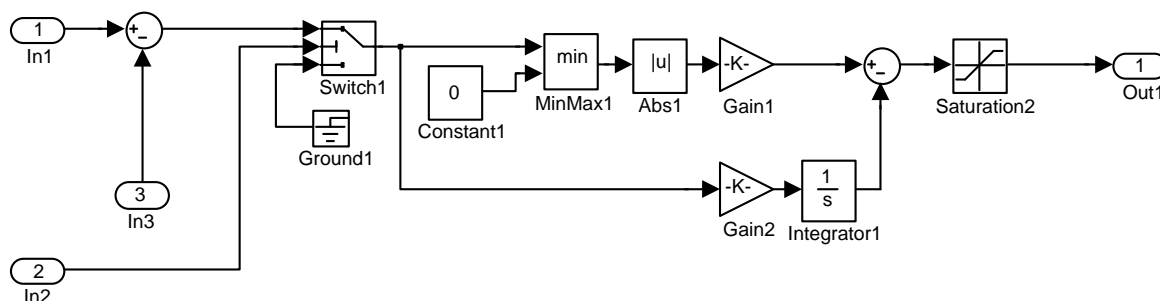


Рисунок 3.18 - Схема ПИ-регулятора подачи воды в виде подсистемы Simulink (Subsystem5)

Для вычисления коэффициентов ПИ - регулятора воспользуемся эмпирическими формулами [20]:

$$K_p = \frac{T}{K \cdot \tau}. \quad (3.15)$$

$$K_i = T. \quad (3.16)$$

Процедуру расчёта коэффициентов настройки ПИ - регуляторов по данным из таблицы 3.7 для двух каналов управления температуры сводим в таблицу 3.11.

Таблица 3.11 – Расчёт коэффициентов настройки ПИ - регуляторов

Расчетный параметр	Значение	
	Канал подачи пара	Канал подачи холодной воды
K	0,75	1,3
T	75,4	44,8
τ	3,5	5,2
K_p	28,35	6,63
K_i	75,4	44,8

Проанализируем работоспособность системы автоматического управления с ПИ-регуляторами температуры по графикам регулирования температуры воды и давления в процессе стерилизации (рисунок 3.19), полученных на базе модели в пакете Simulink (рисунок 3.13).

Как видно из графиков (рисунок 3.19), ПИ - закон управления обеспечил необходимую для технологического процесса точность регулирования температуры на всех стадиях технологического процесса. Контур регулирования давления остался без изменения. Показатели качества процесса регулирования для удобства анализа занесены в таблицу 3.12.

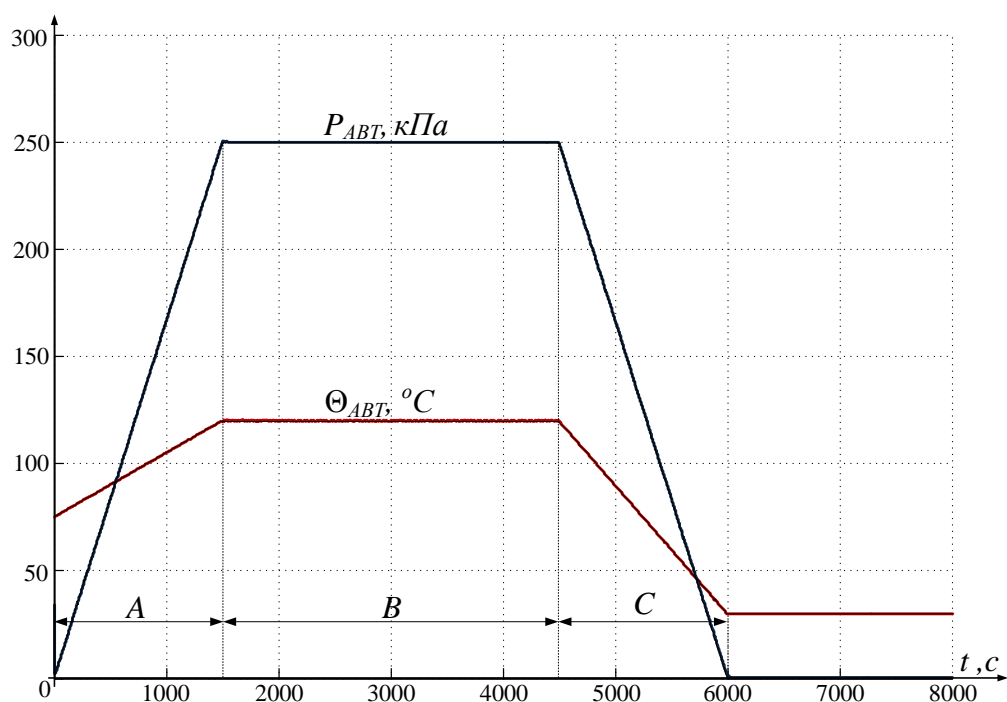


Рисунок 3.19 – Графики регулирования температуры при использовании ПИ - регуляторов и давления при использовании П - регуляторов в процессе стерилизации

Таблица 3.12 – Показатели качества процесса регулирования (рисунок 3.19)

Показатели качества	Значение		
	Период нагрева	Период стерилизации	Период охлаждения
Регулирование температуры Θ_{ABT}			
t_p , сек	1500	3000	1500
σ , %	0	0	0
ε_{cm} , °C	0,01	0,01	0,01
M	0	0	0
Регулирование давления P_{ABT}			
t_p , сек	1500	3000	1500
σ , %	0	0	0
ε_{cm} , кПа	0,3	0,1	0,25
M	0	0	0

Одним из основных требований к САУ является сохранение ее работоспособности при наличии возмущающих факторов. Среди возмущений,

характерных для исследуемой системы, необходимо выделить, прежде всего, возмущения, связанные с энергетическими каналами, обеспечивающими реализацию технологического процесса: паропроводами, водопроводами, воздухопроводами. Данные возмущения проявляются в колебаниях давления теплоносителей (пара, воды) и воздуха на протяженных магистралях в общей подающей сети.

Согласно принятой схеме коммутации в главе 1 на рисунке 1.5 предполагается, что давление в трубопроводах может изменяться в разные моменты времени с 400 кПа до 300 кПа, что составляет 25% от номинального значения. Графики переходных процессов при возмущающем воздействии приведены на рисунках с 3.20 по 3.22.

Доказательством оптимальной работы контура регулирования температуры служат результаты работы его по программе стерилизации с заданной точностью при внесении в процесс регулирования возмущений (рисунок 3.20 и 3.21).

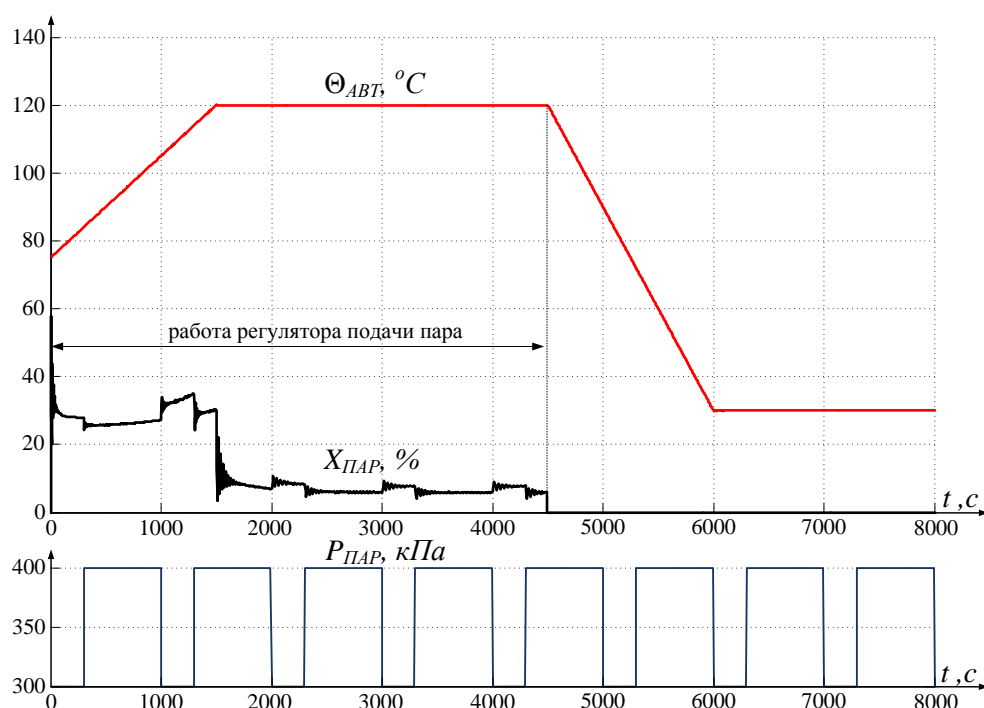


Рисунок 3.20 – Графики регулирования температуры и изменения мощности на выходе регулятора в процессе стерилизации при возмущающем воздействии в канале подачи пара

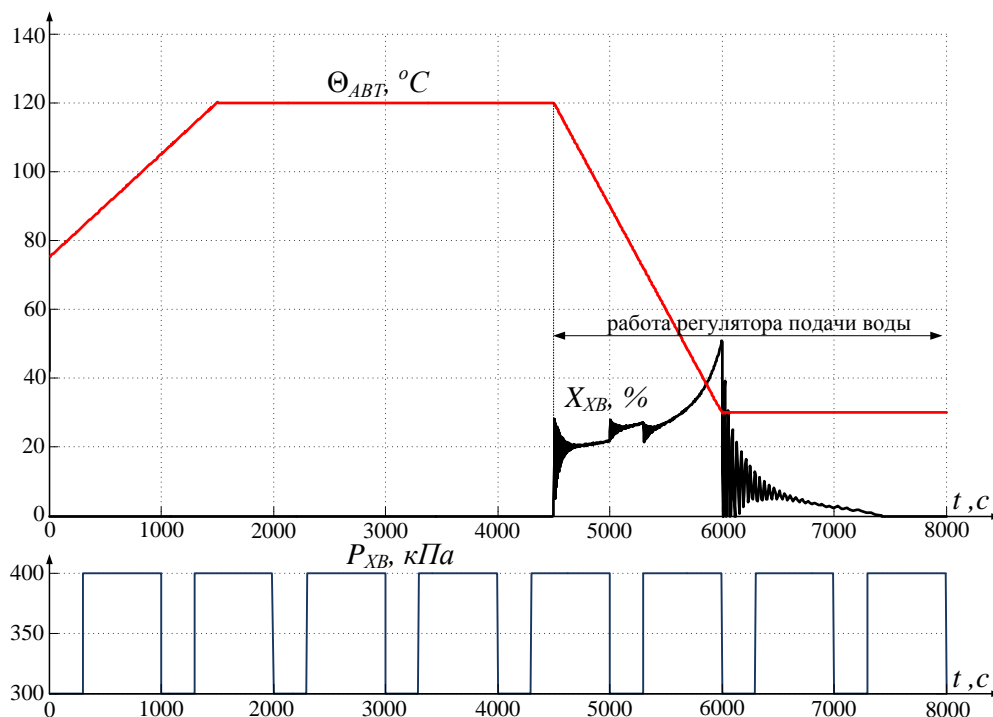


Рисунок 3.21 – Графики регулирования температуры и изменения мощности на выходе регулятора в процессе стерилизации при возмущающем воздействии в канале подачи холодной воды

В отличие от канала регулирования температуры, где регуляторы включаются в зависимости от стадии процесса, в контуре регулирования давления оба регулятора (подачи и слива) работают одновременно в течение всего процесса стерилизации консервов. Считается, что в трубопроводе слива (сброса давления) давление в процессе стерилизации не изменяется и равно нулю. Поэтому рассмотрим только возмущающие воздействия, связанные с изменением давления сжатого воздуха в трубопроводе подачи (рисунок 3.22).

Как видно из графика, регулятор подачи сжатого воздуха в автоклав полностью компенсирует возмущения, связанные с провалами давления с 400 до 300 кПа. При этом по графику выходной мощности регулятора давления видно, что у данного канала регулированию потенциал гораздо больше необходимого. Мощность регулятора на всех стадиях процесса не превышает 5%.

Для удобства визуального анализа параметр мощности регулятора $X_{ВОЗ}$ на графике (рисунок 3.22) увеличен на порядок.

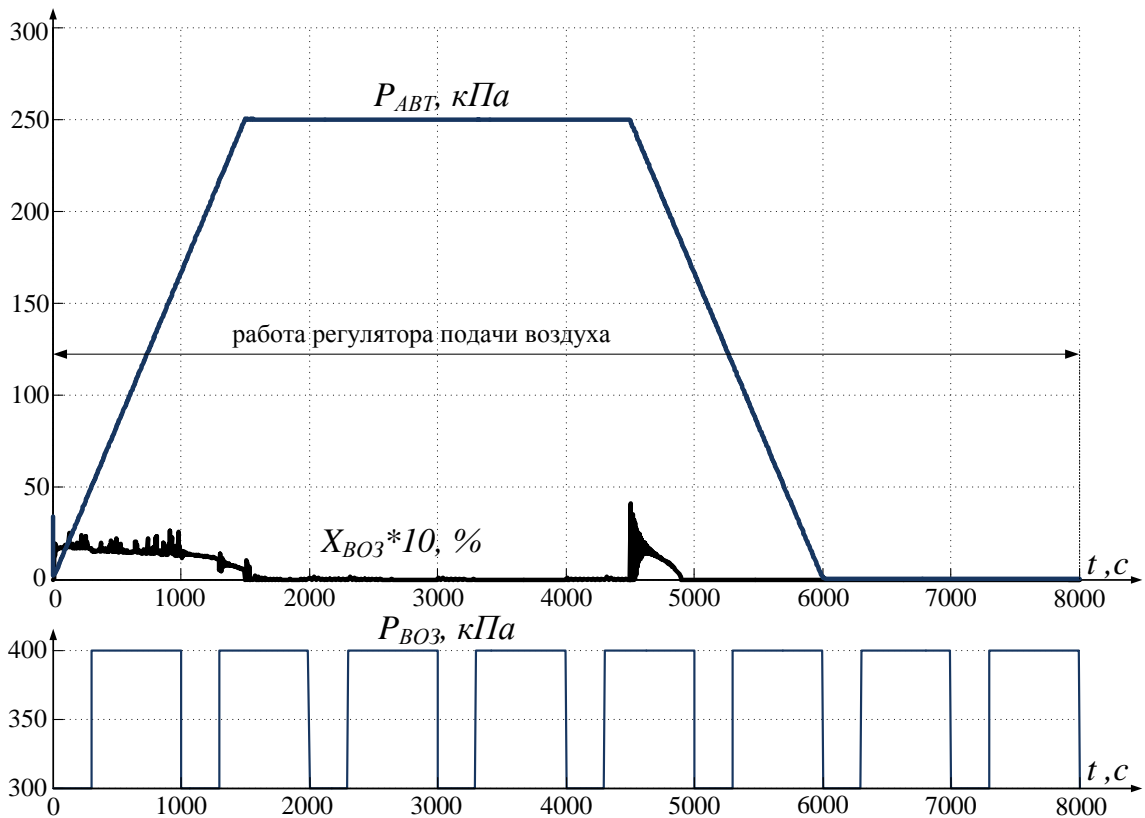


Рисунок 3.22 – Графики регулирования давления и изменения мощности на выходе регулятора в процессе стерилизации при возмущающем воздействии в канале подачи сжатого воздуха

Итак, для нахождения наилучшего решения по структурному синтезу системы автоматического управления технологическим процессом стерилизации консервов в промышленном автоклаве потребовалось произвести последовательный расчет нескольких вариантов корректирующего устройства - регулятора. В результате сравнения выявилось, что оптимальным вариантом для данной системы управления является применение П-регуляторов в обоих каналах регулирования давления (на подачу и на сброс давления) и ПИ-регуляторов в обоих каналах регулирования температуры (на нагрев и на охлаждение).

В то же время, следует отметить, что предлагаемый исследовательский комплекс позволяет провести предварительную настройку систем стерилизации технологические требования к которым могут находиться в достаточно широком диапазоне.

Выводы по третьей главе

1. На основе физического описания технологического процесса стерилизации консервов в промышленном автоклаве разработана математическая модель системы управления в пакете Simulink, применение которой позволяет осуществить разработку системы автоматического управления и её отладку. Предложенная модель является открытой и может эффективно использоваться при проектировании систем управления аппаратов с аналогичными конструкциями и принципами действия.

2. Обоснована целесообразность использования для автоматизации управления параметрами технологического процесса стерилизации консервов современных средств и методов на базе законов автоматического управления.

3. Предложен двухконтурный четырёхканальный регулятор температуры и давления в автоклаве, обеспечивающий снижение объёма бракованной продукции и экономию энергоресурсов, за счет более точной коррекции взаимного влияния контуров регулирования. Регулятор является основой для создания системы автоматического управления, позволяющей производить компенсацию возмущающих воздействий, связанных с изменениями технологических параметров.

Разработанный регулятор может применяться при проектировании систем управления других подобных технологических установок.

4. Для всех этапов технологического процесса сформировано математическое описание, при котором максимальная относительная ошибка аппроксимации не превышает 5 %, что позволяет оптимизировать параметры регуляторов. Задача поиска параметров настройки регуляторов решена на основании графоаналитического метода с использованием кривой разгона. Предложено использование прямых показателей качества для анализа технологического процесса стерилизации консервов. Данный подход обеспечивает переходные процессы с заданными показателями качества, не

уступающими более сложным методам поиска настроек регулятора. Время регулирования соответствует заданному, перерегулирование и статическая ошибка регулирования отсутствуют.

5. Научно обосновано и экспериментально подтверждено, что настройка системы управления на переходный процесс с минимальной квадратичной площадью отклонения позволяет уменьшить энергозатраты и повысить точность процесса регулирования параметров технологического процесса.

ГЛАВА 4. ПРОГРАММНО-АППАРАТНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССОМ СТЕРИЛИЗАЦИИ КОНСЕРВОВ

4.1 Описание структуры системы автоматического управления процессом стерилизации в автоклаве

Особенности конструкции автоклава марки Б6-КА2-В-2 представлены в главе 1 на рисунке 1.4. В состав автоклава входят следующие основные части и компоненты [54]: корпус, первичные измерители технологических параметров, блок арматуры, средства механизации, теплоизоляция. В корпус автоклава вварена термометрическая коробка, нижняя часть которой соединена с внутренней плоскостью автоклава, предназначенная для установки датчиков температуры и давления. Корпус и трубопроводы автоклава теплоизолированы.

Блоки арматуры предназначены для подключения автоклава к магистралям и обеспечивают: подачу пара, подачу воды, подачу сжатого воздуха, верхний и нижний слив воздуха и воды. На подводящих магистралях блоки арматуры для воды, сжатого воздуха и пара собираются из шаровых запорных вентилях, ручных запорно-регулирующих вентилях (ВР), запорно-регулирующих клапанов системы автоматического управления (КЗР) и обратных клапанов (ОК). На магистралях слива блоки арматуры собираются аналогично. Все блоки арматуры снабжены фильтрами. Обвязка автоклава вышеуказанными магистралями и установка на них арматуры приведена на рисунке 4.1.

Для автоматического управления массовым расходом в трубопроводе используется клапан с регулирующим органом, перемещающимся возвратно-поступательно вдоль центральной оси уплотнительной поверхности корпуса, перпендикулярной оси потока среды. В системе используются проходные (прямоточные) клапаны, в которых направление оси потока в корпусе близко к прямолинейному.

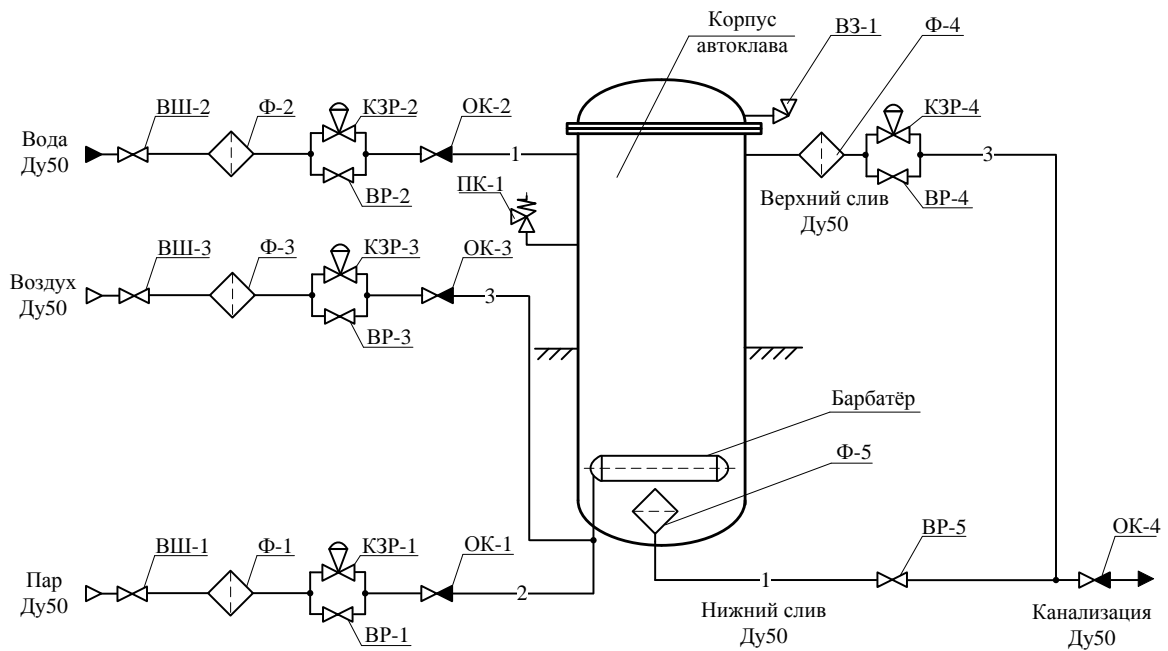


Рисунок 4.1 – Схема обвязки и подключений вертикального автоклава

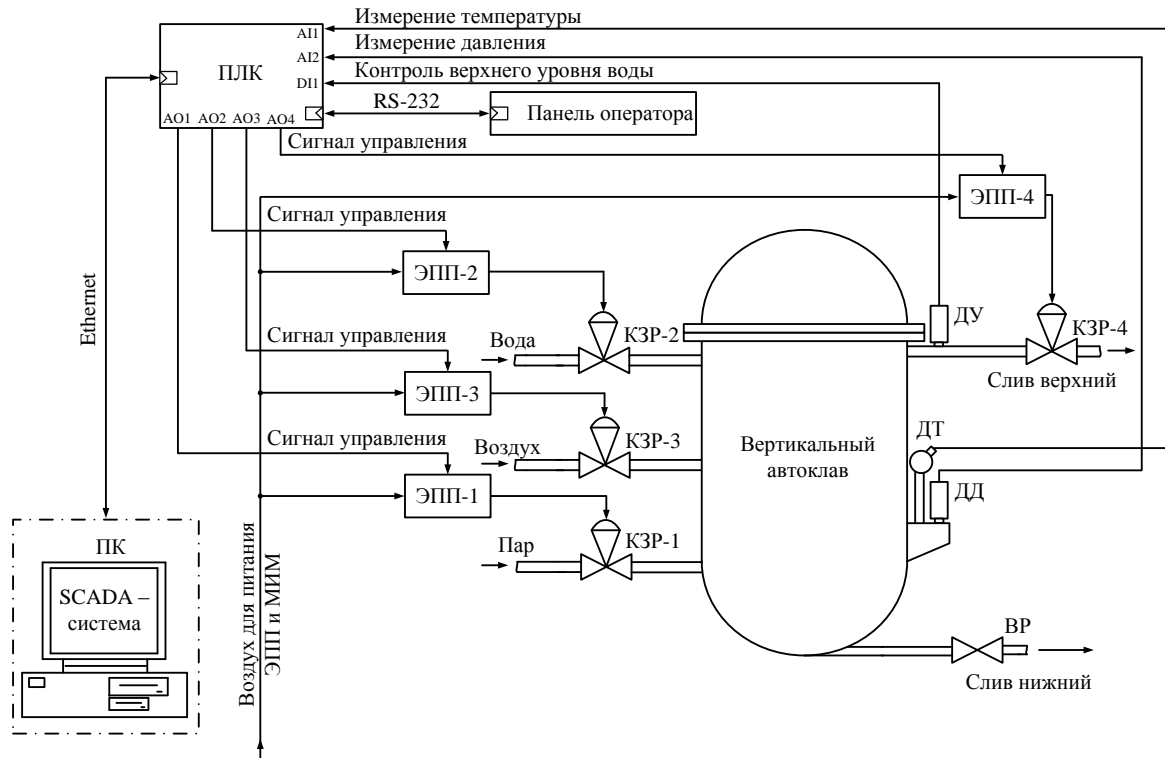
Для ручного управления подачей в магистрали используется вентиль - регулирующий клапан, рабочий орган которого перемещается при помощи резьбовой пары вдоль центральной оси уплотнительной поверхности.

Клапан предохранительный (ПК-1) предназначен для автоматического сброса среды при повышении (в автоклаве) уровня давления среды сверх установленного.

Вентиль запорный угловой (ВЗ) предназначен для ручного сброса остаточного давления в конце цикла стерилизации, перед открытием крышки автоклава.

Стерилизация консервов в воде с противодавлением применяется для консервов как в жестяной, так и в стеклянной таре. После загрузки сеток с банками в автоклав с подогретой водой, причём уровень воды должен быть выше верхнего ряда банок, его крышку герметично закрывают и пускают пар. Температуру и давление регулируют согласно формуле стерилизации (1.1). Давление в автоклаве поддерживается путем подачи воздуха под давлением и

сброса его излишков через клапан верхнего слива. После проведения этапа стерилизации выполняется охлаждение продукта холодной водой, извлечение продукта и опорожнение автоклава через нижний слив. Функциональная схема системы автоматического управления, реализующая данный алгоритм функционирования технологического процесса, приведена на рисунке 4.2 [49].



ПЛК – программируемый логический контроллер; ПК – персональный компьютер; RS-485, Ethernet – интерфейсы связи; ДТ – датчик температуры; ДД – датчик давления; ДУ – датчик уровня воды; ЭПП – электропневматический преобразователь (позиционер) к мембранному исполнительному механизму; КЗР – клапан запорно-регулирующий с мембранным исполнительным механизмом; ВР – вентиль ручного управления.

Рисунок 4.2 – Схема системы автоматического управления технологическим процессом стерилизации консервов в автоклаве

Реализация заданных технологических режимов процесса стерилизации с обеспечением требуемой точности имеет первостепенное значение, так как при этом резко снижается объем бракованной продукции, сокращается время действия повышенной температуры в автоклаве, соответственно снижаются расход энергии, затраты на обслуживание.

Система автоматического управления регулирует два основных параметра процесса стерилизации консервов: температуру и давление. Система включает в себя автоматизированное рабочее место оператора и обеспечивает автоматическое выполнение всех стадий технологического процесса, начиная с подготовительных операций и заканчивая регулированием основных параметров согласно формуле стерилизации (1.1).

В качестве главного управляющего устройства в системе используется программируемый логический контроллер, позволяющий построить на своей основе систему управления требуемой степени сложности [53]. ПЛК нашли своё широкое применение в промышленности за счёт того, что имеют повышенную устойчивость к влиянию производственной среды, малые габаритные размеры, модульную конструкцию с возможностью расширения, простоту замены и ремонта, наличия сторожевого таймера, флэш-памяти, большого количества интерфейсов и т.д.

Контроль оператором за технологическим процессом осуществляется визуально по показаниям приборов (манометра и термометра), установленных в термодержатель автоклава, а также по информации, отражаемой на цифровом дисплее щита управления.

Измерение температуры воды и рабочего давления внутри автоклава осуществляется датчиками (ДТ и ДД) с выходным унифицированным сигналом (4...20 мА). Информация с них поступает на аналоговые унифицированные входы контроллера Analog Input (AI).

Контроль верхнего уровня воды в автоклаве происходит по датчику (ДУ), срабатывающему на контакт с водой. Информация о наличии воды поступает на дискретный вход контроллера Discrete Input (DI).

Параметры регулирования – температура и давление взаимосвязаны, поэтому в системе предусмотрено два связанных контура управления. Для управления выходными устройствами используются четыре аналоговых выхода контроллера Analog Output (АО) с унифицированным сигналом (4...20 мА). В рассматриваемой системе в качестве запорно-регулирующей арматуры применяются односедельные клапаны, прекращающие подачу рабочей среды (воды, воздуха, пара), когда действие управляющего сигнала 4...20 мА прекращается. По этому признаку клапаны относятся к нормально закрытым. В качестве регулирующего органа на клапаны установлен мембранный исполнительный механизм. Выбор данного устройства обусловлен быстротой его срабатывания и высокой чувствительностью к управляющему сигналу. Электрические исполнительные механизмы с электроприводом в этом отношении значительно проигрывают. Так как мембранные исполнительные механизмы являются пневматическими, то для преобразования стандартного электрического сигнала управления (4...20 мА) в пневматический (0,02...0,1 МПа) в схеме используются электропневматические преобразователи (ЭПП).

Алгоритм работы (включения в работу) регулирующих клапанов, согласно рисунку 4.2 приведён в таблице 4.1.

Для управления процессом и отображения информации техпроцесса непосредственно на объекте используется цифровая панель оператора на щите управления. Связь между контроллером и панелью оператора осуществляется по сетевому интерфейсу RS-232.

Для архивирования данных о процессе регулирования используется SCADA-система (Supervisory Control And Data Acquisition System – SCADA) на удалённом компьютере. Передача и архивация данных на верхний уровень осуществляется по интерфейсу Ethernet. В качестве SCADA-системы используется система исполнения визуализаций HMI среды программирования контроллеров CoDeSys [69]. По выбору разработчика может использоваться и другая SCADA-система, работающая с OPC-сервером [65].

Таблица 4.1 - Алгоритм работы регулирующих клапанов

№	Наименование операции	КЗР-1 (пар)	КЗР-2 (вода)	КЗР-3 (воз.)	КЗР-4 (сл. в)	ВР (сл. н)	Положение крышки автоклава
1	Исходное состояние. Автоклав пустой	Нормально закрыты					Крышка открыта
2	Заполнение автоклава водой до нижнего уровня (по времени)	Выкл.	Вкл.	Выкл.	Откр.	Закрыт	Крышка открыта
3	Предварительный нагрев воды в автоклаве до заданной температуры (перед загрузкой консервов)	Вкл.	Выкл.	Выкл.	Откр.	Закрыт	Крышка открыта
4	Загрузка консервов в автоклав	Выкл.	Выкл.	Выкл.	Откр.	Закрыт	Крышка открыта
5	Заполнение автоклава водой до верхнего уровня (ДУ)	Выкл.	Вкл.	Выкл.	Откр.	Закрыт	Крышка закрыта
6	Опрессовка (проверка герметичности автоклава)	Выкл.	Выкл.	Вкл.	Выкл.	Закрыт	Крышка закрыта
7	Нагрев теплоносителя	Вкл.	Выкл.	Вкл.	Вкл.	Закрыт	Крышка закрыта
8	Стерилизация	Вкл.	Выкл.	Вкл.	Вкл.	Закрыт	Крышка закрыта
9	Охлаждение	Выкл.	Вкл.	Вкл.	Вкл.	Закрыт	Крышка закрыта
10	Опорожнение автоклава от воды	Выкл.	Выкл.	Выкл.	Выкл.	Открыт	Крышка открыта
11	Выгрузка консервов из автоклава	Выкл.	Выкл.	Выкл.	Выкл.	Закрыт	Крышка открыта

После завершения цикла стерилизации реализованные режимы стерилизации заносятся в специальный журнал, а термограммы (из архива на персональном компьютере) проверяют технологи.

Необходимо выделить ряд проблем, возникающих при внедрении автоматических систем стерилизации в реальных производственных условиях. К ним относятся, прежде всего, отклонения технологических параметров от нормы в сетевых магистралях подачи пара, воды и сжатого воздуха. Это ведёт к ухудшению показателей процесса регулирования. Исследования, проведённые на ООО «АгроЭкоПродукт» (г. Астрахань) [48], где участок стерилизации состоял из 20 автоклавов (при этом в работе их могло находиться более 8 штук одновременно) показали, что в ходе процесса стерилизации система не всегда успевала реагировать на возникающие возмущения, так как не учитывала большого разброса внешних возмущений в виде изменения параметров в подающих трубопроводах.

В то же время предлагаемая автором система управления (рисунок 4.2) [53, 49] хорошо зарекомендовала себя на небольшом производстве из 3 автоклавов периодического действия.

Если схему коммутации и обвязки автоклава реализовать согласно предлагаемой в диссертации схеме (рисунок 1.5 и 4.1), то отклонений технологических параметров от нормы в системах подающих трубопроводов быть не должно или они не будут превышать уровня 25%. Как было доказано в пункте 3.4, предлагаемая автором система автоматического управления способна отрабатывать данные возмущения. Поэтому, принимая во внимание результаты проведённых исследований [53], можно рекомендовать перед внедрением предлагаемой системы управления вначале выполнить рекомендуемую схему обвязки, либо потребуются усовершенствование структуры автоматической системы управления (рисунок 4.2) до структуры, предложенной в [48] с контролем показаний теплоносителя (Приложение В).

В отличие от системы, показанной на рисунке 4.2, в системе с контролем показаний теплоносителя необходимо расширить количество универсальных аналоговых входов (AI) ПЛК для подключения датчиков измерения температуры и давления в магистралях подающих трубопроводов. Показания с датчиков при этом должны поступать в систему регулирования с целью коррекции

управляющего воздействия при наличии возмущений. Для уменьшения количества датчиков, установленных в магистралях подающих трубопроводов и сигнальных кабелей, информацию целесообразно дублировать на все системы управления автоклавами через локальную сеть RS-485.

Предлагаемая структура (Приложение В) [48] системы управления процессом стерилизации позволит построить комбинированную систему управления, работающую одновременно по отклонению и по возмущению. Однако это противоречит ряду основных требований к системе автоматического управления процессом стерилизации консервной продукции, таких как надёжность, простота в обслуживании и низкая стоимость, указанных в первой главе диссертации.

4.2 Интеграция участка стерилизации консервов в общую информационную систему предприятия

Для построения индивидуальной системы управления автоклавом целесообразнее, как отмечено выше, использовать ПЛК, который работает в нижнем звене автоматической системы управления и непосредственно связан с технологией производства (рисунок 4.3) [53, 60]. Выбираемый для создания системы управления контроллер конструктивно должен иметь моноблочное исполнение, то есть фиксированный набор входов-выходов, выполненных непосредственно на одной плате или шине. Скорость получения сигналов с датчиков и выдача сигналов управления здесь максимальная, что крайне важно для канала управления давлением в автоклаве. Недостатком является низкое время восстановления, так как ремонту подлежит весь контроллер или модуль. Поэтому целесообразно иметь резервный ПЛК с записанной в него актуальной программой функционирования, на случай замены вышедшего из строя.

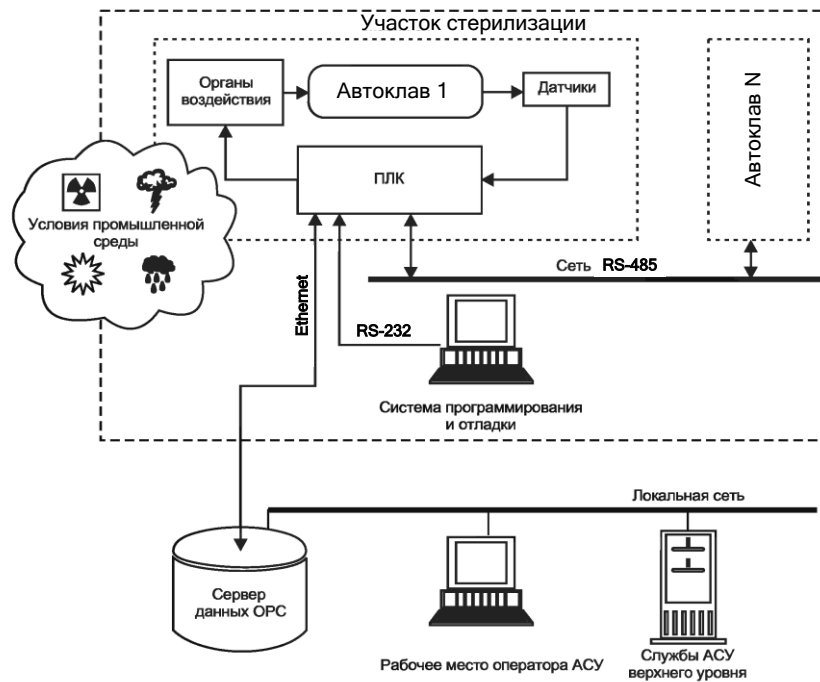


Рисунок 4.3 – Схема передачи данных с участка стерилизации консервов

Для оптимизации ресурсов рассматривалась возможность построения распределенной системы управления участком стерилизации консервов. Её преимуществом является то, что между центральным контроллером и его модулями удалённого ввода-вывода может быть значительное расстояние. Применение стандартных интерфейсов позволяет легко добавлять в систему новые устройства. Это позволило бы использовать для управления несколькими автоклавами один производительный ПЛК и промышленный компьютер. В целом преимущества подобного подхода состоят в возможности удаленного централизованного управления, ведения единой базы данных, а также надежности, гибкости и удобстве построения всей системы. Однако, недостаток системы, заключающийся в низкой скорости передачи измерительного сигнала и сигнала управления, не позволяет организовать качественное управление контуром регулирования давления в процессе стерилизации [64].

В результате развития производства и роста внедрения информационных технологий растет необходимость в интеграции отдельных приборов в системы

управления технологическими процессами. Разделение производства ПЛК, диспетчерских систем и средств программирования стало толчком к появлению стандартных протоколов обмена данными. OPC-сервер входит в комплекс программирования. Он позволяет получать доступ к данным ПЛК. Для этого достаточно обеспечить канал передачи данных ПЛК – OPC-сервер. Вся дальнейшая работа сводится к определению списка доступных переменных, правильной настройке сети, конфигурированию OPC-сервера и SCADA-системы. SCADA – это система, позволяющая работать с информацией, собирать её с различных приборов, передавать на монитор оператора, а также сохранять полученные данные для дальнейшей обработки и просмотра [65].

Помимо отображения параметров процесса производства в реальном времени, хорошие диспетчерские системы позволяют накапливать полученные данные, осуществляют их хранение и анализ, определяют критические ситуации и производят оповещение персонала по каналам телефонной и беспроводной сети, позволяют создавать сценарии управления, формируют данные для анализа экономических характеристик производства.

В реальных производственных условиях, на небольших предприятиях пищевой промышленности, чаще всего используются три нижних уровня автоматизации производственного процесса [50]. Однако тенденции развития информационных технологий и систем управления позволяют создавать на предприятиях полный контроль всех параметров производственного процесса, даже косвенно относящихся к нему. К таким параметрам можно отнести: инженерные системы зданий; контроль работы магистралей с теплоносителем; освещение площадей предприятия; видеонаблюдение и охранно-пожарную сигнализацию, микроклимат в помещениях и многое другое. Тогда участок стерилизации консервной продукции можно интегрировать в общую информационно-управляющую сеть предприятия без дополнительных затрат. Важно, чтобы информационная система управления на участке стерилизации консервов была построена на описанных выше принципах и элементах

автоматического управления и, таким образом, чтобы сохранялась возможность дальнейшей интеграции в информационную сеть всего предприятия.

С учётом вышеизложенного, можно рекомендовать предложенный автором вариант интеграции участка стерилизации консервов в общую информационную систему сбора данных предприятия на базе ПЛК, персональных компьютеров, SCADA-системы и OPC-сервера (рисунок 4.3) [64], основанный на базовых принципах построения информационных сетей предприятия, описанных в [60].

4.3 Аппаратная реализация программно-аппаратного комплекса управления процессом стерилизации консервов

Автоматизация процесса стерилизации консервов связана с рядом трудностей, обусловленных повышенными требованиями к точности ведения технологического процесса, стадийностью работы и необходимостью частой перенастройки режима при изменении вида тары и продукции. В связи с этим реализация процесса управления требует применения специальных программно-управляемых устройств. Не случайно в советское время единственной серийно выпускаемой системой управления процессом стерилизации консервов долгое время являлась система Бином-1Г, основанная на специальных элементах пневмоавтоматики.

Выше доказано, что эффективным решением реализации таких систем является применение ПЛК [49].

Для правильного выбора конкретного программно-управляемого устройства из большого числа предлагаемых на отечественном рынке средств автоматизации, необходимо определить основные технические требования, предъявляемые к данному устройству. В структурной схеме системы автоматического управления (рисунок 4.2) можно выделить основные характеристики управляющего устройства, которые актуальны для построения программно-аппаратного комплекса. Они для удобства анализа в порядке приоритета сведены в таблицу 4.2.

Таблица 4.2 – Характеристики программно-управляющего устройства

Технические характеристики	Значение
Количество входов	2 – аналоговых (AI) 1 – дискретный (DI)
Количество выходов	4 – аналоговых (AO) 0 – дискретных (DO)
Поддержка языков программирования	определяемых стандартом IEC 61131-3 (МЭК 61131-3)
Количество интерфейсов связи	3 (Ethernet; RS-232; RS-485)
Наличие OPC-сервера, драйвера, протокола передачи данных и совместимость со SCADA-системой	+
Поддержка стандартного протокола передачи данных по сети	Modbus и Modbus TCP
Наличие стандартных библиотек программирования и библиотек ПИД-регулирования	+
Наличие внутренней энергонезависимой памяти	+
Возможность подключения цифровой панели оператора	+
Возможность расширения входов и выходов через модули удалённого ввода-вывода	+

Предъявляемым требованиям из таблицы 4.2 наиболее полно удовлетворяет контроллер ОВЕН ПЛК154-220.И-М производства компании ОВЕН (г. Москва). С техническими характеристиками программируемого логического контроллера ОВЕН ПЛК154 можно ознакомиться из руководства по эксплуатации на данный прибор [70].

Для защиты питания контроллера ОВЕН ПЛК154 от импульсных и высокочастотных помех в двухпроводной сети переменного тока 220 В, 50 Гц рекомендуется применить блок сетевого фильтра ОВЕН БСФ-Д2-0,6. Основные функции блока:

- защита контроллера от действия помех, проникающих из сети от работающего электрооборудования;
- подавление высокочастотных помех;
- ослабление импульсных помех.

В системе автоматического управления процессом стерилизации консервов (рисунок 4.2) имеются два основных канала измерения: температуры и давления. Для реализации функции измерения применяются датчики.

Датчики должны удовлетворять следующие основные требования:

- иметь высокую точность измерения;
- быть внесены в реестр средств измерений РФ;
- иметь достаточную для измерения разрешающую способность;
- обладать высокой надежностью и соответствовать требованиям ГОСТ по электромагнитной совместимости с критерием качества функционирования А;
- иметь широкий диапазон рабочих параметров окружающей среды;
- иметь низкую стоимость.

Пользуясь данными требованиями и описанием технологического процесса стерилизации консервов можно выделить основные характеристики датчика температуры, которые актуальны для построения программно-аппаратного комплекса. Они для удобства анализа в порядке приоритета сведены в таблицу 4.3.

Таблица 4.3 – Характеристики датчика температуры

Технические характеристики	Значение
Рабочий диапазон измеряемых температур, °С	0...+150
Длина погружной части, мм	320
Схема подключения датчика	двухпроводная
Класс точности	1,0
Выходной сигнал с датчика	аналоговый 4-20мА
Степень защиты	IP54

Анализ показывает, что целесообразно использовать модель датчика температуры с увеличенной коммутационной головкой, в которую помещается температурный нормирующий преобразователь. Таким образом, необходимо использовать модель со стандартной номинальной статической характеристикой

(100М), измеряющей температуру от минус 50 до плюс 180 °С, стандартным классом допуска (В) и двухпроводной схемой внутренних соединений проводников. Длина монтажной части равна 320 мм. Соответственно в системе используется датчик температуры ОВЕН ДТС065Л-100М.В2.320 со встроенным нормирующим преобразователем ОВЕН НПТ-2.06.1.2.

Преобразователь ОВЕН НПТ-2.06.1.2, совместно с измерительным датчиком предназначен для преобразования значения температуры в унифицированный сигнал постоянного тока 4...20 мА. Преобразователь предназначен для работы с термометрами сопротивления (по ГОСТ Р 8.625-2006) во вторичной аппаратуре систем автоматического управления технологическими процессами.

Основные характеристики датчика давления, которые актуальны для построения программно-аппаратного комплекса, в порядке приоритета сведены в таблицу 4.4.

Таблица 4.4 – Характеристики датчика давления

Характеристики	Значение
Верхний предел измеряемого давления	1000 кПа
Класс точности	1,0
Выходной сигнал	4-20мА
Напряжение питания	24В
Степень защиты	IP54

Предъявляемым требованиям (таблица 4.4) наиболее полно удовлетворяет общепромышленный датчик давления ОВЕН ПД100-ДИ1,0-111-1,0, который благодаря цифровой схеме обладает повышенной надежностью и помехоустойчивостью. В данном микропроцессорном датчике давления реализована современная технология цифровой компенсации для корректировки «нуля» и диапазона измерения. Датчик может быть конфигурирован и калиброван с использованием средств наладки/калибровки (ПК или специального коммуникатора). Данный датчик преобразует давление в унифицированный

сигнал постоянного тока в диапазоне 4-20 мА. Диапазон выходного тока нормирующего преобразователя пропорционален значению физической величины, измеряемой датчиком, и соответствует рабочему диапазону датчика, указанному в его технических характеристиках.

Дополнительным аргументом в пользу выбора данных датчиков является самая низкая цена в классе подобных приборов [47].

Для питания нормирующего преобразователя датчика температуры и датчика давления необходим дополнительный источник - блок питания с выходным напряжением постоянного тока 24В. Основные характеристики блока питания для датчиков, которые актуальны для построения программно-аппаратного комплекса, в порядке приоритета сведены в таблицу 4.5.

Таблица 4.5 – Характеристики блока питания датчиков

Наименование	Значение
Входное напряжение переменного тока, В	90 - 264
Частота, Гц	47...63
Выходное напряжение постоянного тока, В	24 ± 2 %
Количество выходных клеммных пар на 24В	2
Суммарная выходная мощность, Вт	4
Максимальный ток нагрузки канала, мА	165

Для питания стабилизированным напряжением активных датчиков подходит блок питания ОВЕН БП04Б-Д2-24.

Для контроля верхнего уровня воды, который соответствует полному заполнению автоклава водой, может использоваться любой датчик, срабатывающий на контакт с водой. Датчик должен быть установлен в магистраль слива (верхнего перелива) и рассчитан на работу при температуре свыше 120 °С и давления выше 250 кПа. Таким требованиям соответствует датчик-реле потока лепестковое ДР-П-34.

Автоклав с закрытой крышкой заполняется водой и при достижении верхнего уровня, когда верхние банки окажутся под водой, через верхнюю сливную магистраль вода будет сбрасываться в канализацию (рисунок 4.1). Это приводит к срабатыванию датчика-реле потока воды ДР-П-34, что является сигналом, отражающим полное заполнение автоклава водой и готовность перехода от подготовительного режима к основному режиму стерилизации.

На основании информации от датчиков программно-управляющее устройство реализует заданный алгоритм управления исполнительными механизмами – запорно-регулирующими клапанами КЗР (рисунок 4.2). ПЛК выдаёт управляющие сигналы с аналоговых выходов (АО) на электропневматические преобразователи. Последние, получая аналоговый сигнал управления 4-20 мА от контроллера, выдают пневматический сигнал управления на мембранные исполнительные механизмы соответствующих клапанов подачи пара, воды и воздуха, а также клапана верхнего слива. Подключение внешнего блока питания для аналоговых выходов ОВЕН ПЛК150 при этом не требуется, так как блок питания встроен в контроллер и его аналоговые выходы являются активными.

Регулирующие односедельные клапаны с мембранным пневматическим исполнительным механизмом отличаются быстрым срабатыванием и высокой чувствительностью к управляющему сигналу, что позволяет добиться высокой точности регулирования потока среды в трубопроводе [54]. Однако, так как мембранный исполнительный механизм является пневматическим, то для преобразования стандартного электрического сигнала управления от контроллера 4-20 мА в пневматический 0,02-0,1МПа (для управления МИМ) необходимо использовать электропневматический преобразователь. Основные характеристики электропневматического преобразователя, которые актуальны для построения программно-аппаратного комплекса, в порядке приоритета сведены в таблицу 4.6.

Кроме приведенных в таблице 4.6 основных функций преобразования управляющего сигнала, ЭПП должен уменьшать рассогласование хода и повышать быстродействие мембранных пневматических исполнительных

механизмов одностороннего действия путем введения жесткой обратной связи по положению выходного звена исполнительного механизма.

Таблица 4.6 – Характеристики электропневматического преобразователя

Наименование	Значение
Входной сигнал, мА	4 - 20
Основная погрешность, %	0,5
Выходной пневматический аналоговый сигнал, кПа	20-100
Номинальное давление воздуха питания, кПа	250
Входное сопротивление преобразователя, Ом	130
Степень защиты	IP54

Предъявляемым функциям наиболее полно удовлетворяет электропневматический позиционер ЭПП-1.4-20мА.250кПа.10.У1 (с обратным ходом) производства Саранского приборостроительного завода. Он подаёт пропорциональный электрическому току управляющий пневматический сигнал на мембранные исполнительные механизмы МИМ-250.

Электропневматические позиционеры являются следящими регуляторами и отвечают за обеспечение заданной координации положений исполнительных пневматических механизмов в соответствии с командами управляющих сигналов. Команды, в зависимости от заданного рабочего режима, могут быть представлены в виде аналогового сигнала постоянного тока. Структурно в состав ЭПП входит три блока: блок электроники, электропневматический блок, и блок, отвечающий за обратную связь. Для питания электропневматических позиционеров воздухом в его системе подготовки рекомендуется использовать фильтр-стабилизатор давления воздуха.

Мембранный исполнительный механизм совместно с ЭПП устанавливается на односедельный клапан, который применяется как для автоматического регулирования технологического процесса, так и в качестве запорного

устройства. Основные характеристики односедельного регулирующего клапана с МИМ в порядке приоритета сведены в таблицу 4.7.

Функционально клапан должен обеспечивать непрерывное регулирование параметров рабочей среды (давления и температуры) путем изменения пропускной способности.

Таблица 4.7 – Характеристики односедельного регулирующего клапана

Наименование	Значение
Диаметр номинальный, мм	50
Давление номинальное, кПа	1000
Пропускная характеристика	линейная
Условная пропускная способность, м ³ /ч	32
Рабочая среда	Вода, пар, воздух
Условное давление управляющего воздуха, кПа	250
Температура рабочей среды, °С	от 0 до 150
Температура окружающей среды, °С	от минус 15 до 50
Климатическое исполнение по ГОСТ15150	У2
Тип МИМ	МИМ-250

Предъявляемым требованиям из таблицы 4.7 и выполняемым функциям наиболее полно удовлетворяет клапан запорно-регулирующий односедельный фланцевый 25ч42нж Д-50 в комплекте с МИМ-250.

Для контроля и управления программно-аппаратным комплексом со стороны оператора необходимо устройство класса «человеко-машинный интерфейс», предназначенное для ввода параметров управляющей программы функционирования ПЛК, мониторинга функционирования системы и редактирования значений параметров функционирования. Таким устройством является панель оператора. Устройство должно позволять отображать на экране ход выполнения технологического процесса и позволять редактировать значения

параметров, отвечающих за функционирование системы. Основные характеристики панели оператора в порядке приоритета сведены в таблицу 4.8.

Таблица 4.8 – Характеристики панели оператора

Наименования параметра	Значение
Тип дисплея	монохромный
Управление экраном	с кнопок или сенсорное
Разрешение	192x64 пикселя с подсветкой
Напряжение	24 В постоянного тока
Интерфейсы связи	RS232, RS485
Протокол связи	Modbus RTU
Степень защиты передней панели	IP54

Предъявляемым требованиям (таблица 4.8) и выполняемым функциям, с учётом более низкой цены среди подобных устройств, наиболее полно удовлетворяет графическая монохромная панель оператора ОВЕН ИП320. Панель оператора питается постоянным напряжением 24В от одноканального блока питания ОВЕН БП15Б-Д2-24.

Схема электрическая принципиальная системы автоматического управления процессом стерилизации консервов в автоклаве приведена на рисунке 4.4.

Элементы автоматики, входящие в состав схемы электрической принципиальной щита программно-аппаратного комплекса управления процессом стерилизации консервов в автоклаве (рисунок 4.4), приведены в таблице 4.9.

Таблица 4.9 – Перечень элементов схемы электрической принципиальной

Поз. обозн.	Наименование	Кол.	Примечание
A1	Блок сетевого фильтра ОВЕН БСФ-Д2-0,6	1	$U_{\text{ВЫХ}} = 220\text{В}$, 50Гц
A2	Датчик-реле потока воды ДР-П-34	1	
A3	Нормирующий температурный преобразователь ОВЕН НПТ-2.06.1.2.	1	$U_{\text{ВЫХ}} = 4\text{-}20\text{мА}$
A4	Датчик давления ОВЕН ПД100-ДИ1,0-111-1,0	1	0 до 1000 кПа
A5	Программируемый логический контроллер ОВЕН ПЛК154-220.И-М	1	$U_{\text{ПИТ}} = 220\text{В}$, 50Гц
A6	Графическая панель оператора ОВЕН ИП320	1	$U_{\text{ПИТ}} = 24\text{В}$
A7	Персональный компьютер	1	
A8- A11	Электропневматический позиционер ЭПП-1.4-20мА.250кПа.10.У1 (с обратным ходом)	4	$U_{\text{ВХ}} = 4\text{-}20\text{мА}$
ВК1	Датчика температуры ОВЕН ДТС065Л-100М.В2.320	1	-50 до +180 °С
G1	Блок питания ОВЕН БП04Б-Д2-24	2	$U_{\text{ВЫХ}} = 24\text{В}$
G2	Блок питания ОВЕН БП15Б-Д2-24	2	$U_{\text{ВЫХ}} = 24\text{В}$
НЛ1	Арматура светосигнальная ENR-22	1	$U_{\text{Н}} = 220\text{В}$, 50Гц
QF1	Автоматический выключатель ВА47-29/2/С2	1	$I_{\text{Н}} = 1\text{А}$

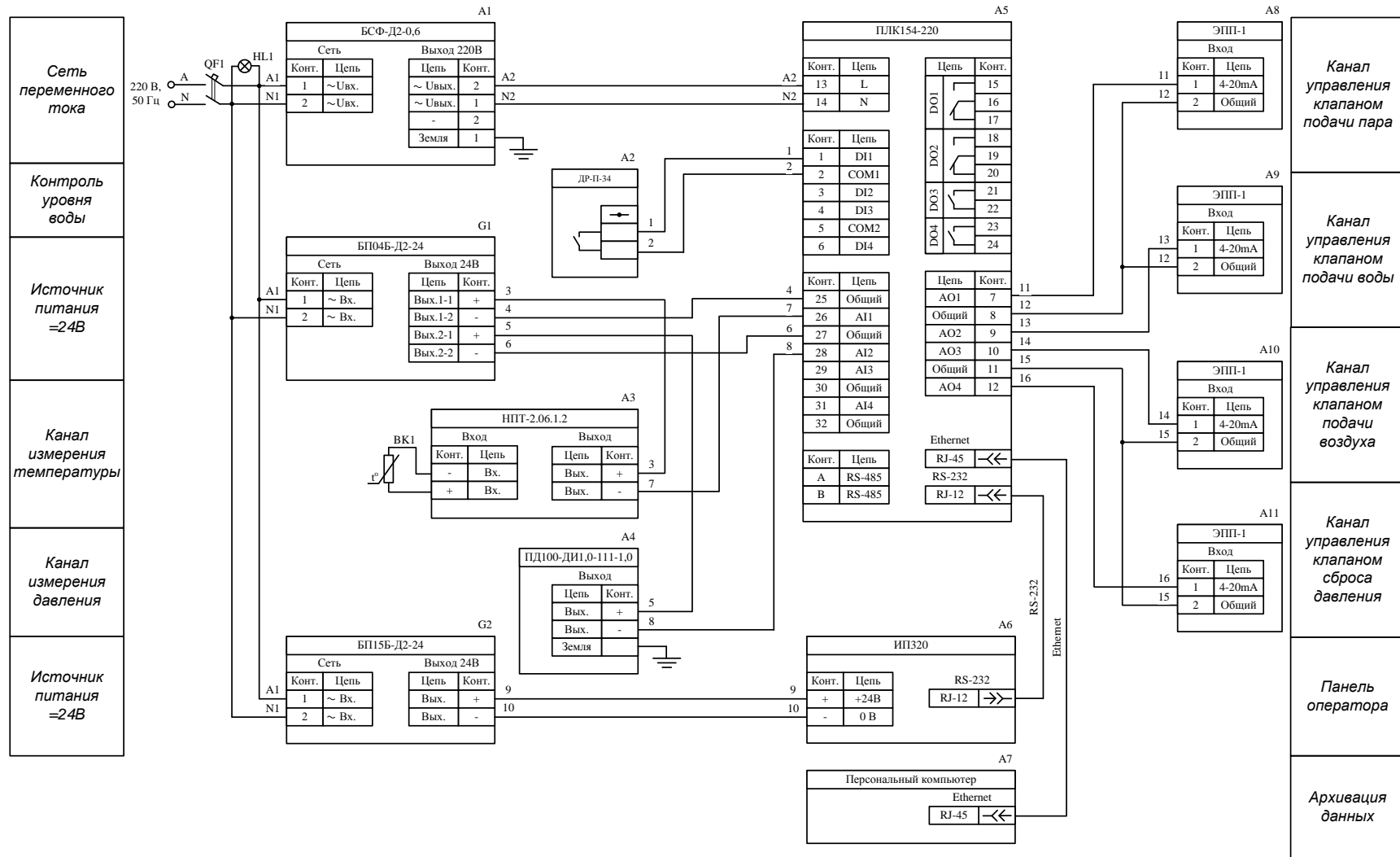


Рисунок 4.4 - Схема электрическая принципиальная программно-аппаратного комплекса управления процессом стерилизации консервов в автоклаве

4.4 Программная реализация программно-аппаратного комплекса управления процессом стерилизации консервов

Применение ПЛК, как отмечено выше, в качестве программно-управляющего устройства позволяет создавать систему управления, которые способны решать задачи, удовлетворяющие требованиям, представленным в работе. Соответствие реализации технологического процесса заданным требованиям определяется, прежде всего, качеством программы, реализующей заданный алгоритм управления [97].

Добиться требуемой точности регулирования можно только с применением современных законов регулирования. Поэтому практически все производители контроллеров и комплексов программирования стараются предоставить разработчику готовую библиотеку регуляторов.

В проекте в качестве программно-управляющих устройств выбраны ПЛК производства компании ОВЕН. Данные ПЛК программируются в соответствии со стандартом МЭК 61131 в среде программирования CoDeSys [66]. Компания ОВЕН и разработчик среды программирования CoDeSys компания Smart Software Solutions предлагают для разработки проектов бесплатную библиотеку стандартных функций и регуляторов [44]. Однако библиотека регуляторов имеет очень лаконичное описание. По нему сложно понять, как именно работает регулятор, в каких случаях какой регулятор стоит выбрать и как производить расчёт настроек выбранного регулятора. Несмотря на то, что в ПЛК предусмотрена функция автонастройки регулятора, после проведения автонастройки приходится производить дополнительную коррекцию для снижения перерегулирования и повышения качества регулирования.

Повысить качество регулирования можно за счёт применения в системе управления современных методов управления, таких как адаптивное, оптимальное или нейро-нечёткое, которые в настоящий момент времени

находятся в интенсивном изучении и развитии. Однако это приведёт к потреблению дополнительных ресурсов контроллера, что может не позволить в полной мере реализовать на выбранном контроллере заданный алгоритм управления.

В главе 3 была реализована и опробована на модели система автоматического регулирования, опирающаяся на классические законы регулирования, учитывающая в работе все стадии процесса и имеющая в своей основе алгоритм взаимосвязанной работы всех четырёх каналов регулирования. Подтверждением вышеизложенному служит график регулирования давления и температуры, полученный путём моделирования (рисунок 3.19.). Система обеспечивает требуемые параметры процесса, в том числе при введении возмущений, что подтверждает наличие в ней требуемого астатизма.

Целью данного раздела является программная реализация автоматической системы управления процессом стерилизации консервов в промышленном автоклаве с выполнением всех режимов работы.

Основной режим работы автоклава заключается в ведении технологического процесса по формуле стерилизации (рисунок 3.3) и состоит из: нагрева теплоносителя до температуры стерилизации, собственно стерилизации консервной продукции при заданной температуре в течение заданного времени и охлаждения консервов подачей холодной воды (пункты с 7 по 10 таблицы 4.1). Общая структура системы управления и программа основного режима работы, реализованная при помощи функциональных блоков в приложении Simulink, приведены в главе 3.

Основному циклу стерилизации предшествует подготовительный режим, автоматизацию которого большинство разработчиков не предусматривает. Однако на него тратится не менее 10% от общего времени всего технологического цикла стерилизации консервов, который начинается от подготовки автоклава к загрузке консервов и заканчивается извлечением из

автоклава продукции (таблица 4.1), поэтому целесообразно включить подготовительный режим в общий цикл автоматизации.

Подготовительный режим включает в себя пункты со 2 по 6 из таблицы 4.1: заполнение автоклава по времени водой до нижнего уровня, предварительный нагрев воды в автоклаве до температуры продукта, загрузка консервов в автоклав и закрытие его крышки (остаются ручными операциями), заполнение автоклава водой до срабатывания датчика верхнего уровня, опрессовка (проверка герметичности) автоклава с закрытой крышкой.

Кроме рассмотренных режимов работы, в систему автоматического управления разумно добавить алгоритм работы автоклава в аварийных ситуациях, при которых система не имея возможности продолжать работу, прекращает управление исполнительными механизмами, передавая управление технологическим процессом в ручной режим оператору (системой блокируется работа всех автоматических регулирующих клапанов). К таким ситуациям относятся: недопустимое отклонение температуры и давления (более 5% от заданного при стерилизации), обрыв датчика давления или температуры.

Блок-схема алгоритма работы программно-аппаратного комплекса во время технологического цикла стерилизации консервов в промышленном автоклаве приведена на рисунке 4.5.

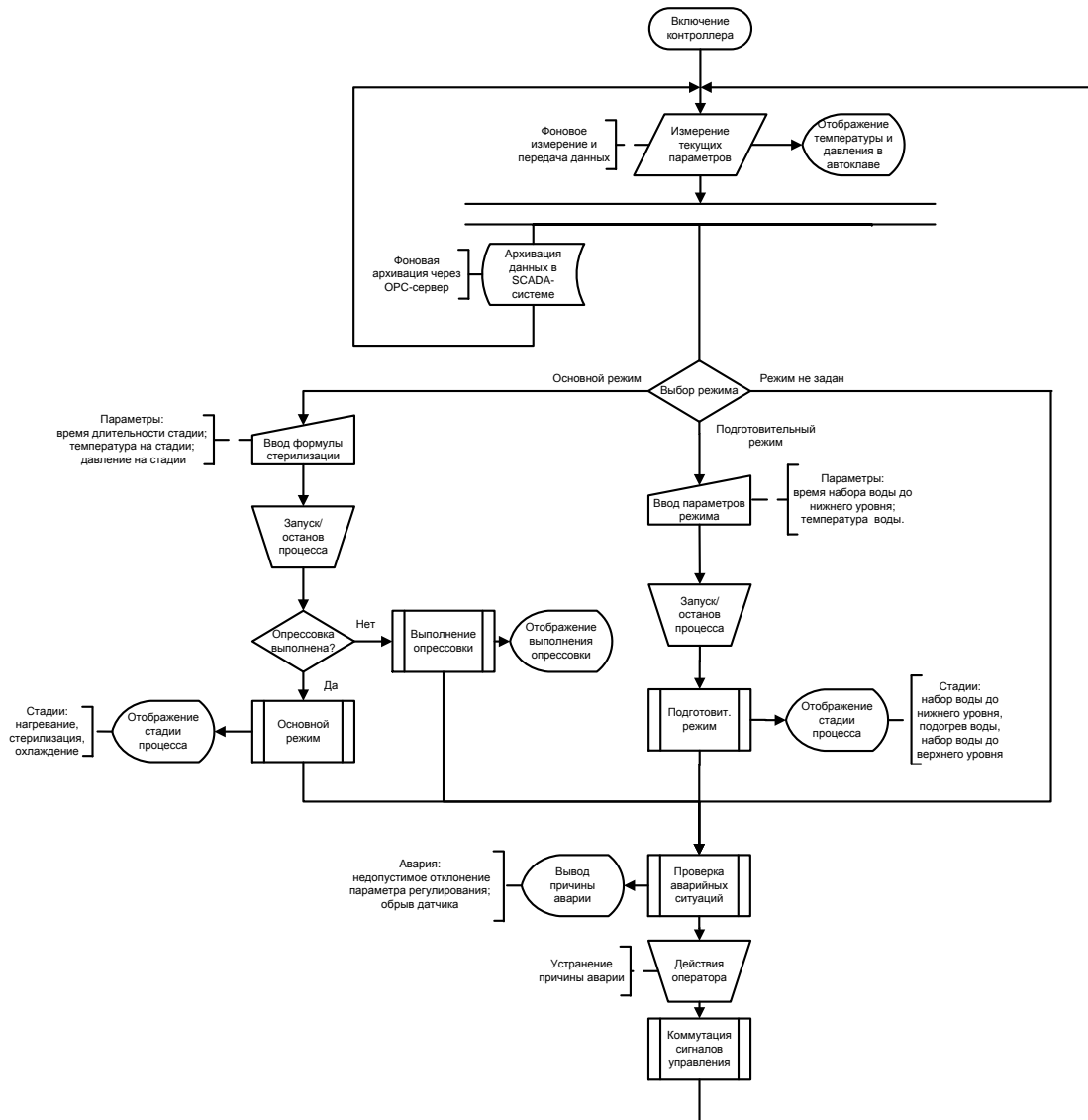


Рисунок 4.5 - Алгоритм работы программно-аппаратного комплекса

В качестве языка программирования для реализации алгоритма на рисунке 4.5 выбран графический язык последовательных функциональных схем SFC, который позволяет описать хронологическую последовательность различных действий в общей программе. Для этого действия связываются с шагами (этапами), а последовательность работы определяется условиями переходов между шагами [22]. Условием перехода является логическая переменная. Действия могут быть прописаны на любом из языков МЭК [69]. В данном случае, для максимального графического и функционального сходства с

программой регулирования, разработанной автором в приложении Simulink, все действия (внутренние подпрограммы) написаны на языке непрерывных функциональных схем CFC.

Программная реализация в среде CoDeSys алгоритма работы программно-аппаратного комплекса, выполненная на языке SFC, приведена на рисунке 4.6.

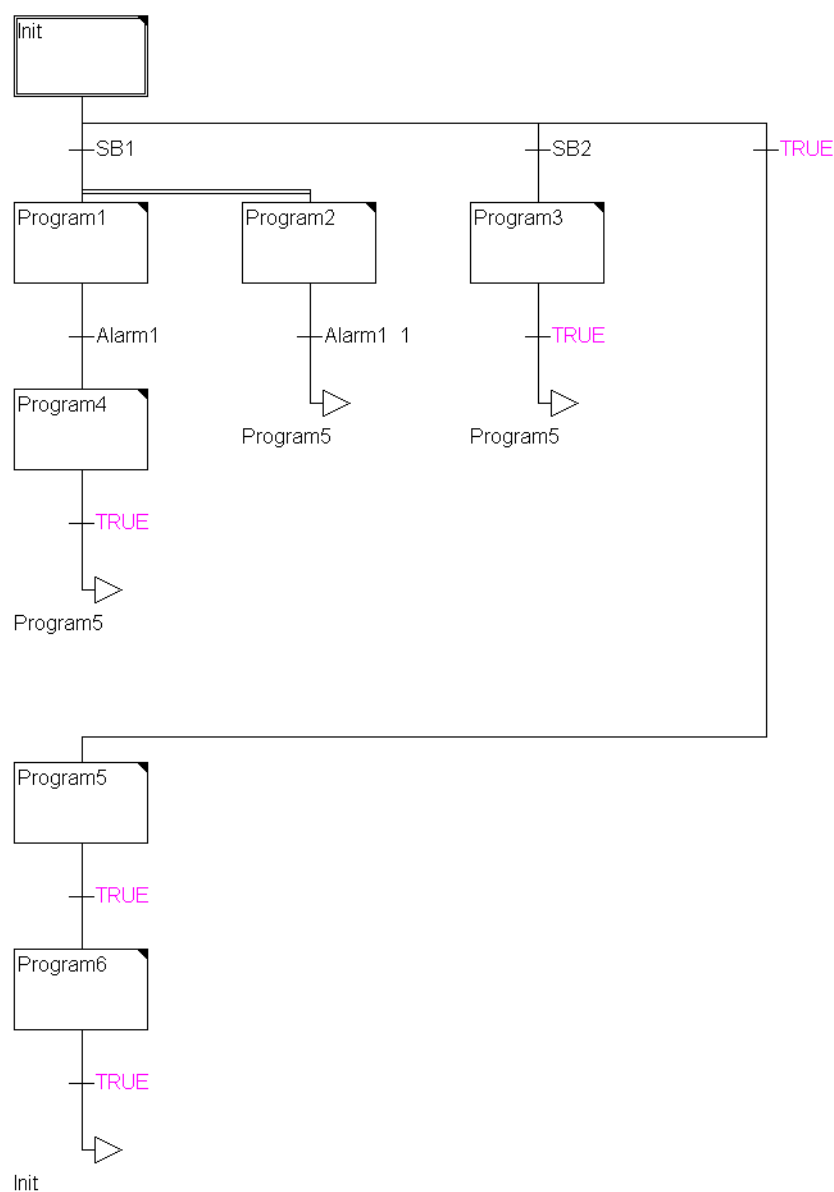


Рисунок 4.6 – Программная реализация алгоритма работы программно-аппаратного комплекса на языке SFC

В программе реализованы три альтернативные ветви. Две левые ветви начинаются с условия выбора режима: основного (переменная SB1) и подготовительного (переменная SB2). Крайняя правая ветвь всегда активна (TRUE) и позволяет, если не выбран не один из режимов работы системы, сразу переходить на шаг проверки аварийных ситуаций и коммутации сигналов управления (для удалённой работы в ручном режиме). Переходы альтернативных ветвей начинают оцениваться слева направо. Первым активируется тот шаг, который следует за первым слева истинным переходом.

Переход с каждой из альтернативных ветвей на заданный шаг выполняется безусловным переходом на шаг, имя которого указано под знаком перехода «jump». Такие переходы нужны для того, чтобы избежать пересекающихся и идущих вверх соединений.

Описание подпрограмм, входящих в схему языка SFC на рисунке 4.6, реализованных в виде действий на языке CFC, сведено в таблицу 4.10.

Таблица 4.10 – Подпрограммы из схемы на языке SFC

Название	Описание
Init	Подпрограмма измерения и передачи данных на дисплей
Program1	Подпрограмма передачи данных о ходе выполнения стадий основного режима работы на дисплей (панель оператора)
Program2	Подпрограмма выполнения опрессовки (проверки автоклава на герметичность) перед основным режимом
Program3	Подпрограмма подготовительного режима работы
Program4	Подпрограмма основного режима работы
Program5	Подпрограмма проверки аварийных ситуаций
Program6	Подпрограмма коммутации сигналов управления

Список переменных, входящих в программы, и их описание представлены в виде таблицы 4.11.

Таблица 4.11 – Объявление переменных в программе

Переменная	Тип данных	Описание
Clock	DWORD	Текущее время, с
T	REAL	Измеренная с датчика температура воды в автоклаве, °С
P	REAL	Измеренное давление в автоклаве, кПа
Tz1	REAL	Заданная температура по времени, °С
Pz1	REAL	Заданное давление по времени, кПа
SB1	BOOL	Включение основного режима
SB2	BOOL	Включение подготовительного режима
S1	BOOL	Включение набора воды до нижнего уровня
S2	BOOL	Включение подогрева воды
S3	BOOL	Включение набора воды до верхнего уровня
ALM	BOOL	Сброс аварийных сигналов
Opressovka	BOOL	Сигнал на проведение опрессовки
k	DWORD	Время опрессовки, с
Step1	REAL	Температура стерилизации, °С
Step2	DWORD	Врем нагревания, с
Step3	REAL	Начальная температура, °С
Step4	DWORD	Врем стерилизации, с
Step5	REAL	Конечна температура, °С
Step6	DWORD	Врем охлаждения, с
Step7	REAL	Давление при стерилизации, кПа
Step9	REAL	Начальное давление, кПа
Step11	REAL	Конечное давление, кПа
Tvod	REAL	Задание температуры подогретой воды, °С
L1	DWORD	Время набора воды до нижнего уровня, с
L2	BOOL	Сигнал с датчика-реле верхнего уровня воды

Продолжение таблицы 4.11

Переменная	Тип данных	Описание
St1	BOOL	Идёт режим стерилизации
St2	BOOL	Идёт режим охлаждения
St3	BOOL	Цикл процесса стерилизации закончен
Alarm1	BOOL	Опрессовка выполнена
Alarm1_1	BOOL	Опрессовка не выполнена
Alarm2	BOOL	Сигнал аварии при обрыве датчика давления
Alarm3	BOOL	Сигнал аварии при обрыве датчика температуры
Alarm4	BOOL	Сигнал аварии при отклонении давления
Alarm5	BOOL	Сигнал аварии при отклонении температуры
Alarm6	BOOL	Сигнал аварии при недопустимом отклонении давления
Alarm7	BOOL	Сигнал аварии при недопустимом отклонении температуры
Alarm0	BOOL	Сигнал предупреждения при аварии
Alarm	BOOL	Сигнал блокировки выходных каналов управления при аварии
Y1	REAL	Сигнал управления с регулятора $Y_{пар}$, %
Y1_1	REAL	Сигнал управления подачей пара в подготовительном режиме, %
Y2	REAL	Сигнал управления с регулятора $Y_{хв}$, %
Y2_1	BOOL	Сигнал включения набора воды в автоклав до нижнего уровня
Y2_2	BOOL	Сигнал включения набора воды в автоклав до верхнего уровня
Y3	REAL	Сигнал управления с регулятора $Y_{воз}$, %
Y4	REAL	Сигнал управления с регулятора $Y_{сл}$, %

Подпрограмма основного режима работы (Program4) активизируется после выбора на пульте оператора соответствующего режима работы системы (SB1:=TRUE) и предварительного проведения опрессовки закрытого автоклава (Program2).

Подпрограмма основного режима работы программно-аппаратного комплекса (рисунок 4.7), как и все остальные подпрограммы, реализована на языке непрерывных функциональных схем CFC. Подпрограмма основного режима полностью повторяет модель системы автоматического управления технологическим процессом стерилизации консервов в промышленном автоклаве в виде подсистем Simulink (рисунок 3.13).

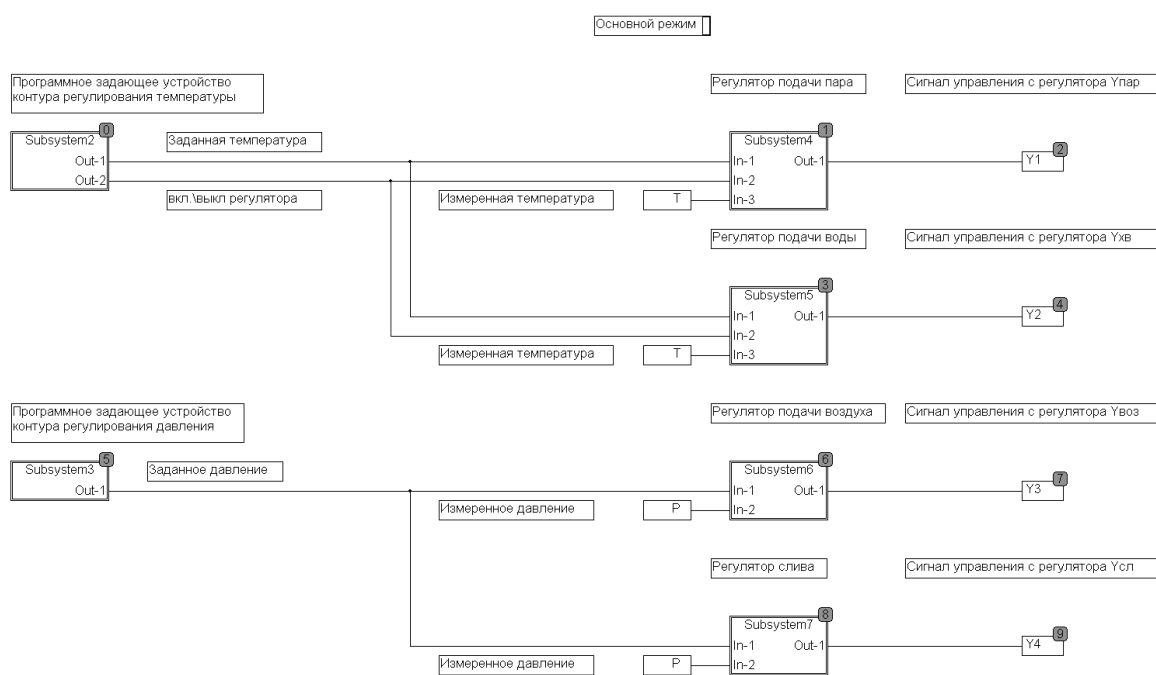


Рисунок 4.7 – Реализация подпрограммы основного режима работы (Program4) на языке CFC в виде макросов

Макросы программы CoDeSys (Subsystem2, Subsystem3, Subsystem4, Subsystem5, Subsystem6, Subsystem7) функционально соответствуют подсистемам Simulink с аналогичными названиями. Поэтому в данном разделе

для примера приводится только реализация программного задающего устройства контура регулирования температуры Subsystem2 (рисунок 4.8) и регулятор подачи пара Subsystem4 (рисунок 4.9). Остальные макросы CoDeSys на рисунке 4.7 реализуются аналогично подсистемам Simulink, приведённым в главе 3.

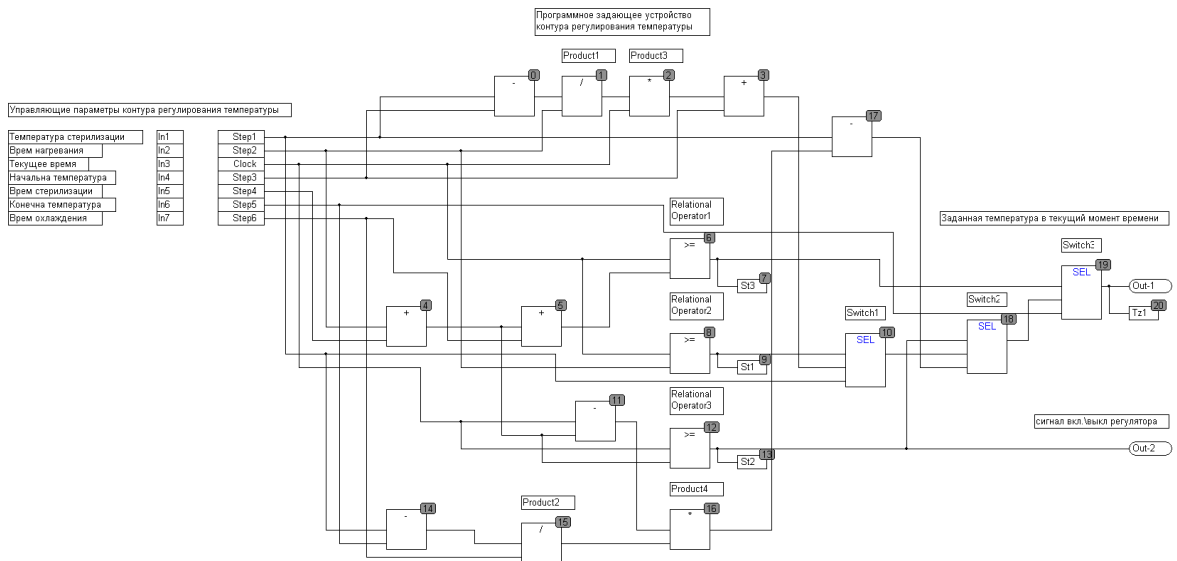


Рисунок 4.8 – Реализация макроса программного задающего устройства (Subsystem2) на языке CFC

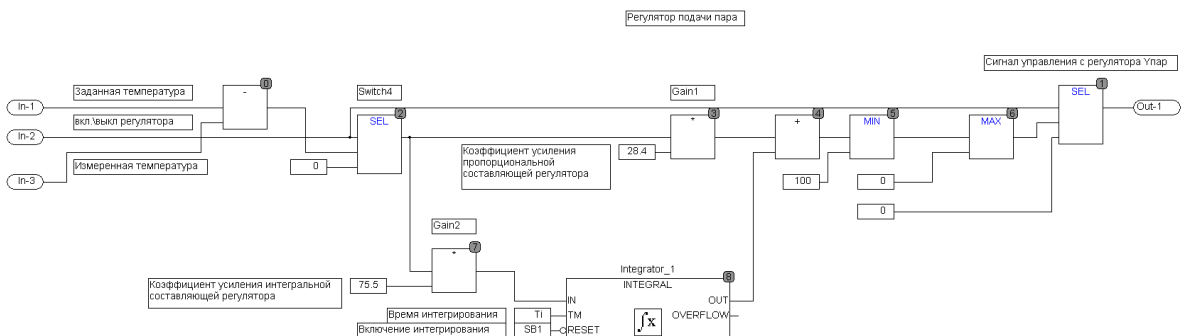


Рисунок 4.9 – Реализация макроса регулятора подачи пара (Subsystem4) на языке CFC

Основное преимущество реализации программы управления в CFC редакторе заключается в том, что в схемы можно непосредственно добавлять каналы обратной связи, как и в программах, разработанных в приложении Simulink. К элементам языка CFC относятся блоки, входы, выходы, возвраты, произвольные переходы, метки и комментарии. Основные функциональные блоки из библиотеки CoDeSys [69], используемые для реализации подпрограмм приведены в таблице 4.12.

Таблица 4.12 – Функциональные блоки и функции CoDeSys

Обозначение элемента	Описание блока
TP	Таймер
TON	Таймер с задержкой включения
RS	Переключатель с доминантой выключения
INTEGRAL	Блок выполнения численного интегрирования
SEL	Бинарный выбор
MIN	Функция минимума, которая возвращает наименьшее из двух значений
MAX	Функция максимума, которая возвращает наибольшее из двух значений
ABS	Возвращает абсолютное значение числа.
AND	Побитное И
OR	Побитное ИЛИ
DWORD_TO_TIME	Преобразование типа данных DWORD в типа данных TIME

Автором предлагается параллельно перед активацией основного режима выполнить проверку автоклава на герметичность. Таким образом, согласно алгоритму работы программно-аппаратного комплекса (рисунок 4.5), перед активацией блока основного режима работы (Program4) требуется выполнение

подпрограммы опрессовки (Program2). Сигналом успешного выполнения опрессовки служит сигнал Alarm1, который должен принять значение TRUE. Эта операция позволит проверить автоклав на герметичность и тем самым позволит предотвратить возникновение аварийных ситуаций, связанных с потерей давления во время работы (если какой либо регулирующий или ручной клапан не герметично закрыт) и уровня воды в автоклаве (если плохо закрыт клапан нижнего слива). Подпрограмма опрессовки (Program2) приведена на рисунке 4.10.

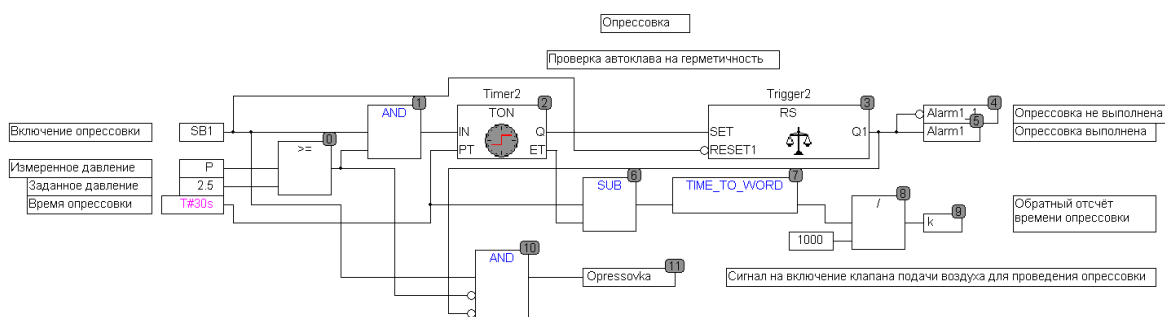


Рисунок 4.10 – Подпрограмма выполнения опрессовки (Program2) на языке CFC

Подпрограмма передачи данных о ходе выполнения стадий основного режима работы на дисплей (Program1) в работе не приводится, так как является типовой подпрограммой и в большей степени зависит от выбранной модели панели оператора. К динамически передаваемым данным можно в первую очередь отнести информацию о текущей выполняемой стадии процесса и времени до окончания выполнения данной стадии. Здесь же можно организовать передачу на дисплей сообщений об аварийных ситуациях в ходе выполнения основного режима работы системы.

Кроме подпрограммы опрессовки, автором предлагается автоматизация ручных подготовительных операций (набор и подогрев воды) в начале цикла стерилизации в виде реализации подпрограммы подготовительного режима

работы (Program3). Программа активируется кнопкой на панели оператора (SB2:=TRUE). Подпрограмма подготовительного режима (Program3) приведена на рисунке 4.11.

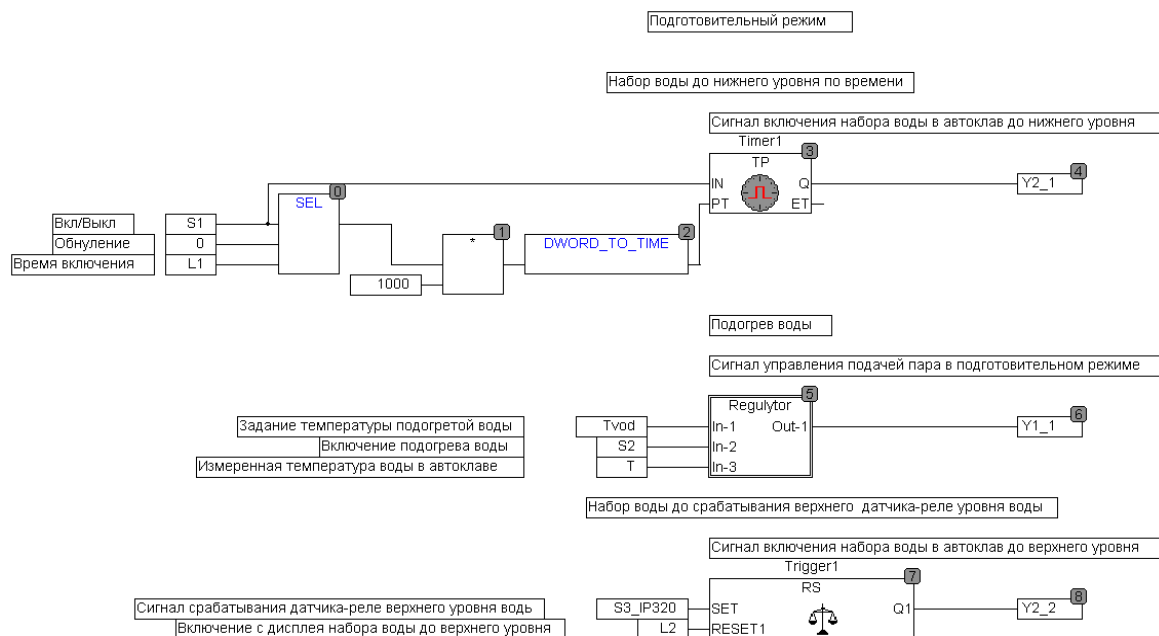


Рисунок 4.11 – Подпрограмма подготовительного режима (Program3) на языке CFC

Макрос Regulytor в подпрограмме (рисунок 4.11) представляет собой ПИ-регулятор температуры, аналогичный реализованному в блоке Subsystem4 (рисунок 4.7).

Контроль и задание параметров в подготовительном режиме, как и в основном режиме, производится с дисплея панели оператора.

В ходе практических испытаний системы автором выделены основные аварийные ситуации, которые должны быть исключены в цикле стерилизации для безопасной работы системы [16]. Подпрограмма проверки аварийных ситуаций (Program5) приведена на рисунке 4.12. При возникновении обрыва в цепи датчиков система блокирует работу выходных устройств программно-аппаратного комплекса. Процесс может быть продолжен только в ручном

режиме по показаниям приборов измерения, установленных по месту (ртутному термометру и стрелочному манометру).

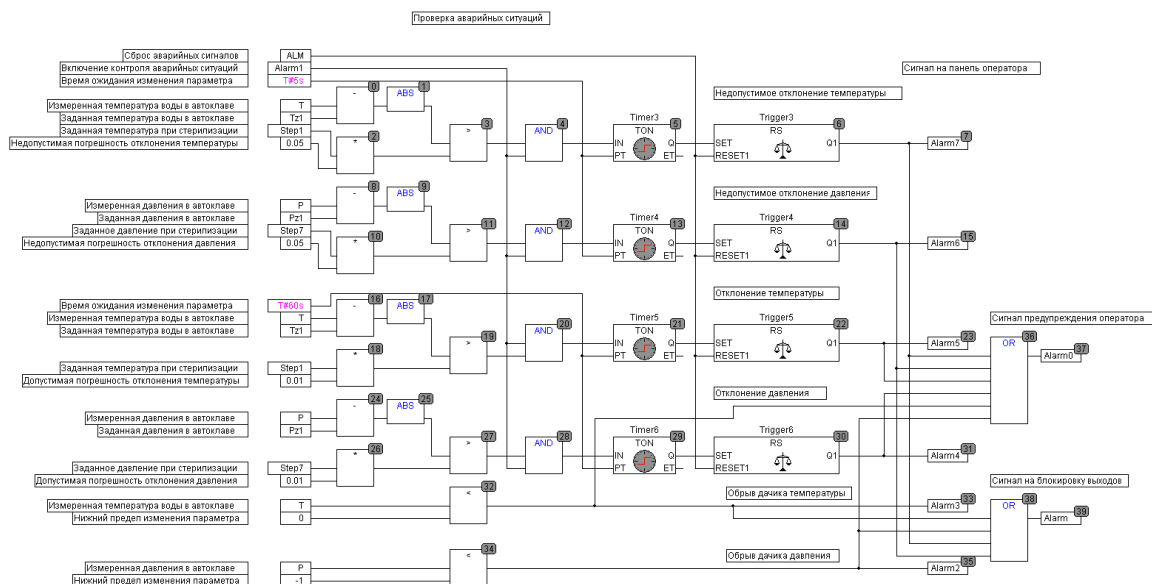


Рисунок 4.12 – Подпрограмма проверки аварийных ситуаций (Program5) на языке CFC

При незначительном отклонении температуры и давления от заданных значений (1%) система выдаёт сообщение на дисплей панели оператора, при этом не блокируется работа исполнительных механизмов. Оператор при этом должен предпринять действия по устранению аварийной ситуации. Если отклонение параметра достигнет недопустимого значения свыше 5%, то система блокирует работу исполнительных механизмов и процесс может быть продолжен только в ручном режиме. Такое отклонение означает, что по причине аварии в исполнительных механизмах система не смогла автоматически устранить отклонение. На устранение аварии (за исключением обрыва датчика) выделяется 1 минута (согласно требованиям к системе), после чего система переводит работу клапанов в ручной режим.

Подпрограмма коммутации сигналов управления (Program6) является последней в цикле работы контроллера. Подпрограмма выполняет коммутацию на управляющие выходы контроллера сигналов управления в зависимости от того какая подпрограмма активирована в настоящее время. Подпрограмма коммутации сигналов управления (Program6) приведена на рисунке 4.13.

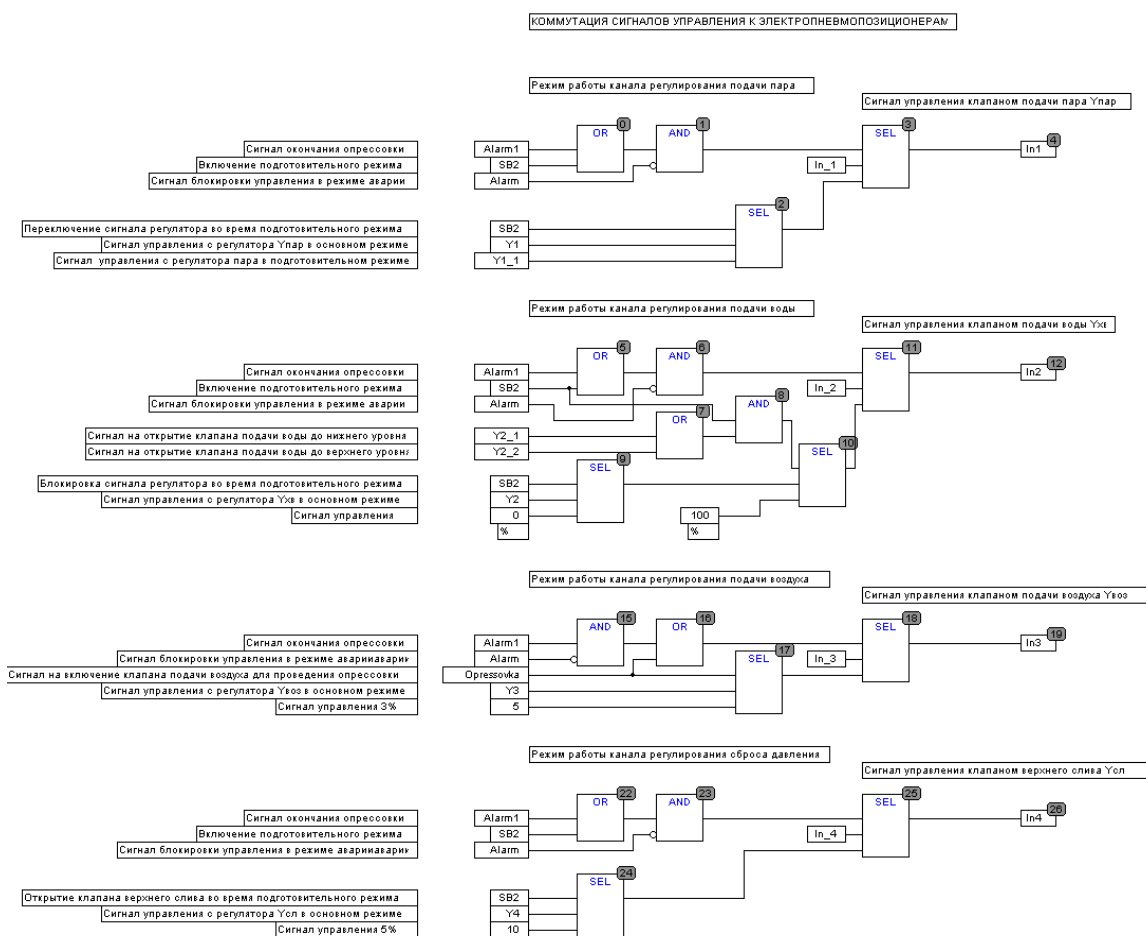


Рисунок 4.13 – Подпрограмма коммутации сигналов управления (Program6) на языке CFC

Подпрограмма проверки аварийных ситуаций имеет приоритет в подпрограмме коммутации сигналов и всегда может заблокировать сигналы управления, подав на выходы контроллера нулевой сигнал управления.

Подпрограмма Init для измерения и передачи данных на дисплей не представлена, так как является типовой подпрограммой и в большей степени зависит от выбранной модели панели оператора.

Согласно схеме аппаратной реализации системы управления (рисунок 4.4), в качестве устройства создания человеко-машинного интерфейса выбрана цифровая панель оператора ОВЕН ИП320. Панель имеет графический монохромный жидкокристаллический дисплей 3.7" с подсветкой. Размер дисплея 100x35 мм, разрешение дисплея 192x64 точки. Этого достаточно для отображения основных параметров, а так же для удобного взаимодействия оператора с панелью. На панели можно отображать буквы и символы (русские или английские), динамический текст, различные графические изображения, задавать параметры для чтения и редактирования, индикаторы состояния процесса, графики, линейки, элементы переключения экранов и т.п.

Несмотря на то, что одновременно на экране дисплея можно разместить всего четыре строки информации, т.е. объем отражаемой информации ограничен, предусмотрена возможность последовательного отображения большого количества пользовательских экранов, переключение между которыми происходит либо вручную, либо автоматически по команде с контроллера. Экраны настройки параметров системы (коэффициентов регуляторов и т.п.) могут быть скрыты и защищены с помощью пароля от несанкционированного изменения их значений.

Для управления и ввода информации панель имеет 20 кнопок: восемь управляющих и двенадцать цифровых и функциональных. Все кнопки могут быть запрограммированы как функциональные. В этом случае по их нажатию будет осуществляться некоторая операция (вызов нужного экрана, изменение значения параметра, управление каким-либо механизмом и др.)

В случае аварийной ситуации поверх всех окон появляется сигнальное окно с указанием причины аварии. В данном окне есть кнопка для сброса

аварии и перехода в основное меню, а также кнопка СТОП для останова процесса.

Ориентируясь на ограничения и возможности выбранной панели оператора ИП320, автором предлагается рациональное распределение основной информации на шести экранах (таблица 4.13).

Таблица 4.13 – Информация на экранах панели оператора

Переменная в программе	Элемент панели оператора	Описание действия
Экран №1. Выбор режима работы		
SB1	Кнопка	Включение основного режима
SB2	Кнопка	Включение подготовительного режима
T	Регистр	Измеренная температура воды в автоклаве
P	Регистр	Измеренное давление в автоклаве
Экран №2. Ввод значения параметров (формула стерилизации)		
Step3	Регистр	Начальная температура
Step1	Регистр	Температура стерилизации
Step5	Регистр	Конечна температура
Step9	Регистр	Начальное давление
Step7	Регистр	Давление при стерилизации
Step11	Регистр	Конечное давление
Экран №3. Время стадии процесса стерилизации (формула стерилизации)		
Step2	Регистр	Врем нагревания
Step4	Регистр	Врем стерилизации
Step6	Регистр	Врем охлаждения
Экран №4. Подготовительные режим		
S1	Кнопка	Включение набора воды до нижнего уровня
Y2_1	Индикатор	Сигнал набора воды до нижнего уровня

Продолжение таблицы 4.13

Переменная в программе	Элемент панели оператора	Описание действия
L1	Регистр	Время набора воды до нижнего уровня
S2	Кнопка с индикатором	Включение подогрева воды
Tvod	Регистр	Задание температуры подогретой воды
S3	Кнопка	Включение набора воды до верхнего уровня
Y2_2	Индикатор	Сигнал набора воды до верхнего уровня
T	Регистр	Измеренная температура воды в автоклаве
P	Регистр	Измеренное давление в автоклаве
Экран №5. Отображение процесса стерилизации		
T	Регистр (крупно)	Измеренная температура воды в автоклаве
P	Регистр (крупно)	Измеренное давление в автоклаве
STR1	Динамический текст	Отображение стадии (фазы) основного режима работы
Clock1	Регистр	Время длительности стадии режима
Экран №6. Отображение аварийных ситуаций		
STR2	Динамический текст	Трансляция аварии в контуре регулирования температуры
STR3	Динамический текст	Трансляция аварии в контуре регулирования давления
T	Регистр	Измеренная температура воды в автоклаве
P	Регистр	Измеренное давление в автоклаве
ALM	Функциональная кнопка	Сброс аварийных сигналов

Интерфейс можно дополнить экранами с дополнительной информацией: наименования продукта и тары, количество банок, номер варки, ФИО оператора, номер смены и т.д. Однако, это приведёт к усложнению в реализации системы управления при отсутствии явной необходимости в данной информации, так как она дублируется в специальном журнале.

В ходе производственных испытаний было получено, что целесообразно подключать панель ИП320 по интерфейсу RS-232 в режиме «Мастера сети»

(Master), так как в данном режиме отражается потеря связи между панелью оператора и ПЛК.

Расположение панели оператора на щите управления и отображение информации на экране панели приведено на рисунке 4.14 и 4.15.



Рисунок 4.14 – Внешний вид щита управления программно-аппаратного комплекса



Рисунок 4.15 – Отображение информации на панели оператора ИП320

Согласно алгоритму работы программно-аппаратного комплекса (рисунок 4.5), архивация данных в SCADA-системе происходит параллельно с работой системы регулирования в фоновом режиме за счёт применения OPC-сервера. Для работы с контроллерами ОВЕН используется OPC-сервер 3S-Software.

SCADA-система применяется для архивации данных с целью централизованного сбора информации о ходе процесса регулирования и состоянии автоклава. Это позволяет формировать архив основных данных (регистрацию давления, температуры, времени и аварийных ситуаций) каждой варки консервов с возможностью просмотра и распечатки на принтере по каждому конкретному автоклаву.

В качестве SCADA-системы может быть использовано любое программное обеспечение, выполняющее регистрацию технологических параметров (не менее двух на каждый автоклав) передаваемых по OPC-серверу. В том числе можно использовать систему исполнения визуализаций CoDeSys HMI.

Пример отображения термобатиграммы – графика регулирования температуры (красным) и давления (синим) по времени, приведён на рисунке 4.16.

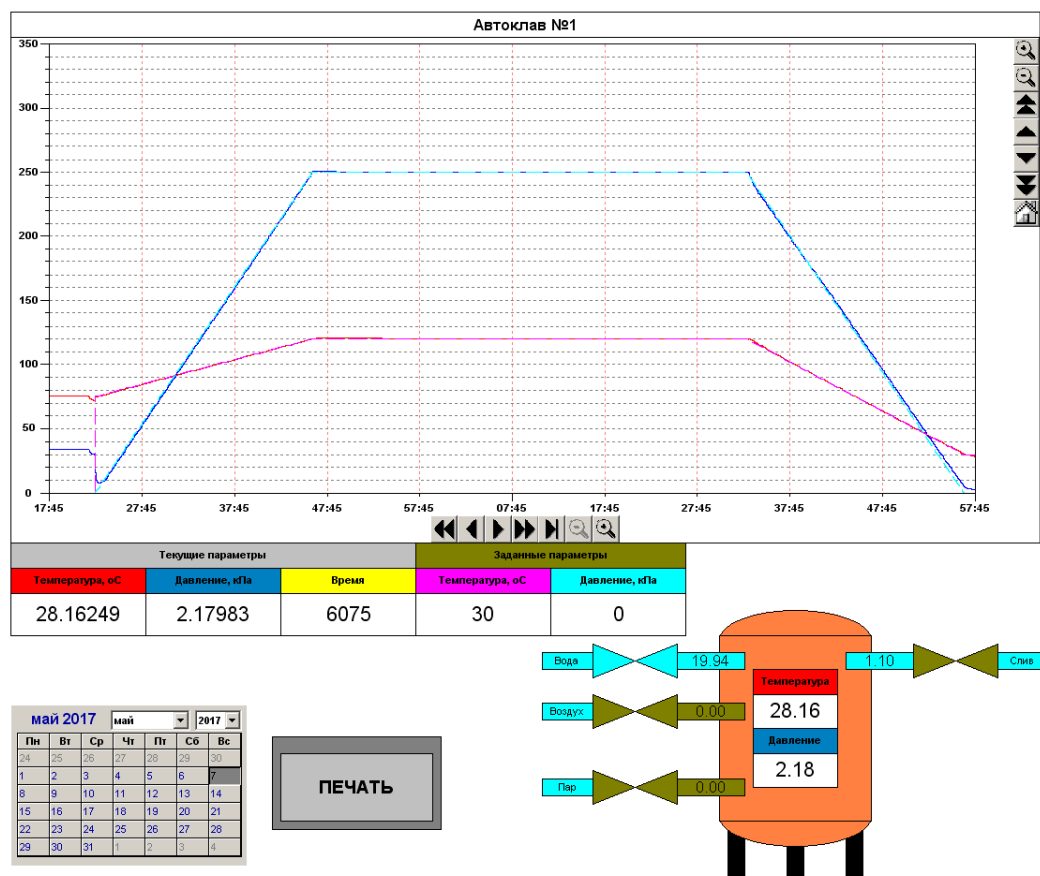


Рисунок 4.16 – Интерфейс окна отображения данных с автоклава в SCADA-системе программно-аппаратного комплекса

Данные, для удобства работы, должны архивироваться в отдельных файлах по дате.

Кроме основных данных (термобатиграммы по номеру автоклава, в SCADA-системе можно организовать ведение учёта дополнительных данных (номер варки, наименование продукта, номер партии, количество банок, формулу стерилизации, Ф.И.О. сменного оператора и мастера) по каждой партии консервов с возможностью просмотра и распечатки на принтере,

процедуру учёта выработки ресурсов датчиков и управляемых клапанов, наблюдение за ходом технологического процесса с компьютера технолога.

Улучшение качества документации путём внедрения электронного документооборота с использованием SCADA-системы особенно важно для специалистов лаборатории по контролю качества продукции. Это позволит исключить работу с бумажными носителями и создаст предпосылки автоматизации процесса обработки данных.

Кроме регистрации данных в SCADA-системе по интерфейсу Ethernet на персональный компьютер технолога, в системе есть возможность организации дублированной регистрации данных технологического процесса на карту памяти, дополнительно приобретаемого к основной системе модуля сбора данных по незадействованному интерфейсу RS-485.

4.5 Технико-экономическая эффективность внедрения на производстве программно-аппаратного комплекса

Результаты автоматизации технологического процесса будут во многом зависеть от того, насколько в процессе эксплуатации применяемая система автоматического управления удовлетворяет поставленным перед ней основным требованиям, к которым относятся [1, 79]:

- качество и устойчивость регулирования;
- надёжность работы;
- корректная эксплуатация средств автоматики;
- возможность формирования режима, обеспечивающего максимальную производительность;
- возможность быстрой перенастройки на режим обработки другого продукта;

Разработанный программно-аппаратный комплекс реализует следующие основные функции [53]:

- сбор и первичная обработка информации с датчиков;
- передача команд оператора в устройства системы управления;
- ввод и изменение с панели оператора формулы стерилизации, по которой будет производиться варка, для каждого автоклава;
- расчет и формирование законов изменения управляемых параметров для реализации автоматического регулирования процессом стерилизации;
- автоматическое управление исполнительными механизмами (клапанами) для точной реализации заданной формулы стерилизации;
- автоматическое заполнение автоклава водой, предварительный подогрев воды до температуры продукта и проверка закрытого автоклава на герметичность;
- контроль и предотвращение аварийных ситуаций для обеспечения безопасной работы автоклава;
- блокировку регулирования и выдачу сигнала с указанием причины аварии на панели оператора при аварийном состоянии системы;
- возможность ручного управления автоклавом в аварийном режиме;
- передача информации от щита управления, установленного в цехе, на компьютер технолога;
- отображение текущей информации о параметрах варки в табличном и графическом виде (графики зависимостей давления и температуры от времени) на мониторе компьютера;
- централизованный сбор, хранение и обработка полученной информации о ходе процесса и состоянии автоклава на персональном компьютере;
- формирование архива термобатиграмм каждой варки консервов с возможностью просмотра и распечатки на принтере;

- представление сохраненной ранее информации в удобном для оператора и технолога виде, печать отчетов;
- связь с серверами и различными сетевыми структурами (рисунок 4.3).

Таким образом, предлагаемая система управления процессом стерилизации консервов в промышленном автоклаве обеспечивает [49]:

- надлежащее качество продукции благодаря точному поддержанию режима технологического процесса по температуре и давлению при стерилизации консервов;
- экономию энергоресурсов благодаря оптимизации технологического режима и точного соблюдения алгоритмов работы;
- автоматизацию ручных подготовительных операций, при этом не требуется постоянного присутствия оператора во время подготовительного режима;
- увеличение ресурса автоклавной установки путем точного соблюдения технологического режима работы;
- безопасность работы установки за счет наличия автоматических защит и блокировок;
- централизованный сбор данных о ходе технологического процесса и улучшение качества документации путём внедрения электронного документооборота;
- снижение трудоёмкости обслуживания и эксплуатации.

Внедрение данной системы автоматизации позволяет получать экономический эффект в виде снижения себестоимости и повышения качества продукции.

Если рассматривать предложенный вариант реализации системы управления с точки зрения надежности, то можно отметить, что система управления более пяти лет функционирует в качестве управляющего комплекса

в промышленных условиях пищекомбината «Росинка» (г. Яранск, Кировская область) на трёх автоклавах марки Б6-КАВ-В2. За время эксплуатации не было отмечено отказов, зависаний программных средств или иных неполадок в работе. В ходе эксплуатации подтверждены высокая работоспособность и эффективность программно-аппаратного комплекса. По словам обслуживающего персонала, система очень проста и интуитивно понятна в управлении и эксплуатации. Акты внедрения системы управления представлены в приложении Г.

Теоретические исследования были продолжены в рамках научно-исследовательской работы по гранту от федерального государственного бюджетного учреждения «Фонд содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере» на тему «Разработка программно-аппаратного комплекса управления процессом стерилизации пищевых продуктов в автоклавах» (договор №4612ГУ2/2014 от 23.12.2014, конкурс УМНИК 2-14-12).

Рассмотренные типовые промышленные системы имеют более низкие показатели качества управления и используют на подготовительном этапе ручные операции, где сказывается человеческий фактор. Предлагаемая система полностью исключила эти недостатки. Таким образом, можно сделать вывод об эффективности применения предлагаемой системы в установках для стерилизации консервов.

Выводы по четвёртой главе

1. Определена структура и параметры системы автоматического управления технологическим процессом стерилизации консервов в промышленном автоклаве, выбраны технические средства, реализующие разработанный алгоритм управления.

2. Предложенный алгоритм управления отличается тем, что в общий автоматизированный цикл технологического процесса включены этапы

заполнения автоклава водой, подогрева воды и проверки автоклава на герметичность на подготовительном этапе.

3. В конечном итоге, в том числе за счет корректного исследования созданных моделей, разработан программно-аппаратный комплекс, учитывающий результаты проведенных в диссертации исследований. Основой комплекса является программируемый логический контроллер, позволяющий как реализовывать требуемые алгоритмы управления, так и обеспечить необходимую гибкость системы управления.

4. Разработанный комплекс позволяет реализовывать графики управления процессом стерилизации, определяемые параметрами заданного процесса регулирования. Комплекс опирается на человеко-машинный интерфейс, одной из основных функций которого является реализация алгоритмов управления в соответствии с заданными формулами стерилизации. Таким образом, обеспечивается требуемое и безопасное управление процессом стерилизации консервов в промышленном автоклаве.

5. Результаты опытно-промышленных испытаний показали, что система обеспечивает требуемое качество управления и является астатической по отношению к возмущающим воздействиям. Кроме того, показана возможность оптимизации алгоритмов управления и других проектных решений методом моделирования, опирающихся на созданные в работе динамические структурные схемы и модели.

6. Результаты диссертационной работы использованы при автоматизации существующего стерилизационного оборудования на ООО Консервный завод «Росинка» (г. Яранск, Кировская обл.). Разработанный программно-аппаратный комплекс управления параметрами технологического процесса стерилизации консервов внедрён на производство для опытно-промышленной эксплуатации. Опыт эксплуатации подтвердил достоверность и эффективность, представленных в работе научных положений и практических рекомендаций.

7. Разработанный программно-аппаратный комплекс для управления процессом стерилизации консервов в промышленном автоклаве позволяет существенно повысить эффективность работы автоклава марки Б6-КАВ-В2, кроме того, он может быть применен с целью автоматизации подобных процессов в других типах технологических установок.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Диссертационные исследования направлены на создание системы автоматизации технологического процесса стерилизации консервов в промышленном автоклаве, обеспечивающей повышение качества продукции, эффективности и гибкости технологической установки.

В процессе выполнения диссертационной работы получены следующие результаты, имеющие как научное, так и практическое значение:

1. Исследование современного состояния производства консервов выявило недостатки современных отечественных систем автоматического управления технологическим процессом стерилизации консервов. Сформулированы основные показатели качества, система технических требований и ограничений, позволяющие рационально решать задачи автоматического управления технологическим процессом стерилизации консервов в промышленном автоклаве.

2. Выполнена разработка структуры и выбор комплекса технических средств для реализации системы автоматического управления технологическим процессом стерилизации с целью снижения доли ручного труда, экономии энергоресурсов и повышения качества готовой продукции.

3. Разработана и исследована математическая модель технологического процесса стерилизации консервов в промышленном автоклаве, наибольшим образом соответствующая физической природе протекающих в автоклаве теплообменных процессов, учитывающая не только тепловую ёмкость воды и продукта в автоклаве, но и тепловую ёмкость корпуса автоклава.

Модель, организованная по блочному принципу, отражает математическое описание процессов во внутреннем объёме автоклава. Характерной особенностью модели является учёт взаимной связи температуры и давления. Созданная на базе ЭВМ модель процесса является основой для проведения дальнейших научно-практических исследований.

4. Предложена структура системы автоматического управления технологическим процессом стерилизации консервов в промышленном автоклаве, опирающаяся на теорию автоматического управления и методы имитационного моделирования. Разработанная структура системы автоматического управления технологическим процессом является открытой и может эффективно использоваться при проектировании систем управления аппаратов, реализующих аналогичные технологии.

5. Разработан алгоритм и структура системы автоматического управления технологическим процессом стерилизации консервов, реализующие современные законы автоматического управления и учитывающие взаимное влияние управляющих координат. Алгоритм автоматического управления технологическим процессом обеспечивает снижение доли брака и экономию энергоресурсов за счет более точного регулирования технологических параметров и компенсации взаимного влияния контуров регулирования для всех технологических стадий процесса стерилизации.

Предложенный алгоритм может использоваться для усовершенствования существующих и создания новых систем автоматического управления стерилизационными установками.

6. Определены состав, структура и технические решения программно-аппаратного комплекса для управления технологическим процессом стерилизации консервов.

Программно-аппаратный комплекс позволяет добиться более глубокой автоматизации, охватывающий в том числе подготовительные операции, что, в свою очередь, существенно сокращает ручной труд в производственном цикле стерилизации консервов.

7. В результате проведенных исследований поставлена и решена задача заданного управления многостадийным процессом стерилизации консервов в промышленном автоклаве при паровом нагреве в воде с противодействием за счет создания перепрограммируемой системы автоматического управления.

8. Система автоматического управления процессом стерилизации консервов в промышленном автоклаве, выполненная в виде программно-аппаратного комплекса с автоматизированным рабочим местом оператора практически реализована и внедрена в технологический процесс на ООО Консервный завод «Росинка» (г. Яранск, Кировская обл.).

9. Новизна полученных результатов подтверждается анализом научно-технической литературы, полученным свидетельством о регистрации программы для ЭВМ, а также апробацией работы на ежегодных всероссийских научно-практических конференциях ВятГУ. Основные положения диссертации, методы и результаты исследований опубликованы в работах [29,44, 43,46,47,48,49,51,53,56,64,76], разработана документация на создание программно-аппаратного комплекса, написана программа работы ПЛК, предложена конфигурация экранов панели оператора и SCADA-системы.

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

АРМ - автоматизированное рабочее место

ВЗ - вентиль запорный

ВР - вентиль ручной

И - интегральный

КЗР - клапан запорно-регулирующий

МИМ - мембранный исполнительный механизм

ОК - обратный клапан

П - пропорциональный

ПД - пропорционально-дифференциальный

ПИ - пропорционально-интегральный

ПИД - пропорционально-интегрально-дифференциальный

ПК - персональный компьютер

ПЛК - программируемый логический контроллер

САУ - система автоматического управления

ЭПП - электропневматический преобразователь

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Автоматизация технологических процессов пищевых производств: учеб. для вузов по спец. "Автоматизация и комплекс. механизация хим.-технол. процессов" / Е. Б. Карпин, О. И. Авен, И. К. Петров и др.; Под ред. Е. Б. Карпина. – М : Агропромиздат, 1985. – 535 с.
2. Автоматическая система управления автоклавом САУСТ-ПЛК. Техническое описание и инструкция по эксплуатации. РАС 10.00.00.18 ТО. ООО "Рыбопромышленные автоматизированные системы".
3. Аминов М.С. Аппараты для стерилизации консервов. – М.: Пищевая промышленность, 1966. – 120 с.
4. Аминов М.С. Теоретическое и экспериментальное обоснование непрерывной стерилизации консервов в потоке горячего воздуха: автореф. дис. ... д-ра техн. наук: №175 – Ленинград, 1969. – 21 с.
5. Аминов М.С., Аминова Э.М., Горун Е.Г. Производство консервов. – М.:Агропромиздат, 1987. – 304 с.
6. Андрияшин А.В. Управление и инноватика в теплоэнергетике: учебное пособие/ А.В. Андрияшин, В.Р. Сабанин, Н.И. Смирнов. – М.: Издательский дом МЭИ, 2011 – 392 с.
7. Анхимюк В.Л., Опейко О.Ф., Михеев Н.Н. Теория автоматического управления. – Минск: Дизайн ПРО, 2000. – 352 с.
8. Асмаев М.П., Корнилов Ю.Г. Моделирование процессов пищевых производств. – М.: Лёгкая и пищевая промышленность, 1982. – 176 с.
9. Ахмедов М. Э. Разработка и создание новых ресурсосберегающих способов консервирования и эффективных устройств и аппаратов для тепловой стерилизации консервов: автореф. дис. ... д-ра техн. наук: 05.18.12 / Ахмедов Магомед Эминович – Махачкала, 2011. – 49 с.

10. Бабарин В. П. Тепловая стерилизация плодовоовощных консервов (теория и практика): дис. ... д-ра техн. наук в виде научного доклада: 05.18.13 и 05.18.12 / Бабарин Виктор Петрович. – Москва, 1994. – 64 с.
11. Бабарин В.П. Стерилизация консервов: справочник. – СПб.: ГИОРД, 2006. – 312 с.
12. Белоусов Л.П., Осипов А.М. Технология консервирования и технологический контроль. – М.: Экономика, 1965. – 432 с.
13. Бодров А.У. Оптимизация процесса стерилизации консервов в автоклаве и его математическое моделирование: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.18.12 – Л., 1986. – 16 с.
14. Бункин П.Я. Типовые регуляторы систем управления: Методические указания к лабораторным работам/ П.Я. Бункин. – Владивосток: Издательский дом Дальневосточного федерального университета, 2013. – 25 с.
15. Бурцева Ю. С. Беспойсковый метод расчета настроек регуляторов на минимум квадратичного критерия: дис. ... канд. техн. наук: 05.13.06 / Бурцева Юлия Сергеевна. – Москва, 2014. – 156 с.
16. Введение диагностических функций и исключение аварийных ситуаций в работе дискретных систем управления, реализованных на программируемых логических контроллерах [Электронный ресурс] / Е. Н. Малышев, С. А. Мокрушин // Всероссийская ежегодная научно-техническая конференция «Общество, наука, инновации» (НТК-2012). Общеуниверситетская секция, БФ, ГФ, ФЭМ, ФАВТ, ФАМ, ФПМТ, ФСА, ХФ, ЭТФ : 16-27 апр. 2012 г. : сб. материалов / Вят. гос. ун-т ; отв. ред. С. Г. Литвинец. – Киров, 2012. – 1 электрон. опт. диск (CD-ROM). - (Факультет автоматизи и вычислительной техники. Секция «Оптимизация управления электромеханических систем». Статья № 6).
17. Власов А. В. Повышение эффективности стерилизации консервов паром в автоклавах: дис. ... канд. техн. наук: 05.18.12 и 05.13.06 / Власов Александр Валентинович. – Мурманск, 2010. – 167 с.

18. Войтенко В.П. Квазиоптимальные промышленные регуляторы с нейроидентификацией объекта управления. – Чернигов: Черниговский гос. технол. ун-т, 2013. – 337 с.

19. 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.

20. Глинков Г.М., Маковский В.А., Лотман С.Л., Шапировский М.Р. Проектирование систем контроля и автоматического регулирования металлургических процессов. – М.: Металлургия, 1986. – 352 с.

21. Грачёв Ю.П., Тубольцев А.К., Тубольцев В.К. Моделирование и оптимизация тепло- и массообменных процессов пищевых производств. – М: Лёгкая и пищевая промышленность, 1984. – 216 с.

22. Грудинин В.С., Малышев Е.Н., Мокрушин С.А. Информационно-графическое моделирование процессов для программирования ПЛК// Труды VII Международной (VIII Всероссийской) научно-технической конференции по автоматизированному электроприводу (секция 2: Новые электроприводы, электродвигатели, преобразователи и устройства управления): ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина». – Иваново, 2012 г., с.355-359.

23. Гуревич Д.Ф. Конструирование и расчёт трубопроводной арматуры. – Ленинград: Машиностроение, 1968 – 888 с.

24. Гусаковский З.П., Очкин В.А. Технология и оборудование мясоконсервного производства. – М.: Пищевая промышленность, 1970. – 400 с.

25. Дикий Б.Ф., Фан-Юнг А.Ф. Автоматизация консервного производства. – М.: Пищевая промышленность, 1966. – 341 с.

26. Дикис М.Я., Мальский А.Н. Технологическое оборудование консервных заводов. – М.: Пищевая промышленность, 1969.- 779 с.

27. Жежера Н.И. Автоматизация испытаний изделий на герметичность: учебное пособие/Н.И. Жежера. – Оренбург: ГОУ ОГУ, 2005. – 475 с.
28. Зонин В.Г. Современная технология мясных консервных продуктов. – СПб.: Профессия, 2008. – 224 с.
29. Исследование типовой конструкции автоклава с целью дальнейшей автоматизации процесса стерилизации [Электронный ресурс] / С. А. Мокрушин, В. С. Хорошавин // Всероссийская ежегодная научно-техническая конференция «Общество, наука, инновации» (НТК-2012). Общеуниверситетская секция, БФ, ГФ, ФЭМ, ФАВТ, ФАМ, ФПМТ, ФСА, ХФ, ЭТФ : 16-27 апр. 2012 г. : сб. материалов / Вят. гос. ун-т ; отв. ред. С. Г. Литвинец. – Киров, 2012. – 1 электрон. опт. диск (CD-ROM). - (Факультет автоматизации и вычислительной техники. Секция «Оптимизация управления электромеханических систем». Статья № 9).
30. Кайченков А. В. Разработка и исследование модернизированного способа стерилизации консервов из гидробионтов: дис. ... канд. техн. наук: 05.18.04 и 05.13.06 / Кайченков Александр Вячеславович. – Мурманск, 2011. – 191с.
31. Киргин Д. С. Энергосберегающие технологии вулканизации в автоматизированных системах производства резиновых изделий: дис. ... канд. техн. наук: 05.13.06 / Киргин Дмитрий Сергеевич. – Иркутск, 2013. – 155 с.
32. Ключников В. В. Проектирование систем управления технологическими процессами и аппаратами пищевых производств (задачи и упражнения): учебное пособие/ В. В. Ключников. – Барнаул : Изд-во АлтГТУ, 2010. – 161 с.
33. Комиссарчик В.Ф. Автоматическое регулирование технологических процессов: учебное пособие/ В. Ф. Комиссарчик. – Тверь: Тверской государственный технический университет, 2001 – 247 с.

34. Корнилов Ю.Г., Асмаев М.П. Теплообменные установки пищевой промышленности как объекты управления. – Краснодар: Кубанский государственный университет, 1977. – 92 с.

35. Кошечкина С. Е. Математическое моделирование процесса тепловой стерилизации и технологического комплекса оборудования для консервных производств малой мощности: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.18.12 / Кошечкина Софья Евгеньевна – Краснодар, 1996. – 24 с.

36. Лукин О.Г. и др. Курсовое и дипломное проектирование технологического оборудования пищевых производств. – М.: Агропромиздат, 1990. – 269 с.

37. Магергут В.З., Вент Д.П., Кацер И.А. Инженерные методы выбора и расчёта оптимальных настроек промышленных регуляторов. – Новомосковск: НФ РХТУ им. Д.И. Менделеева, 1994. – 158 с.

38. Мартыненко И.И., Лысенков В.Ф. Проектирование систем автоматики. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Агропромиздат, 1990. – 243с.

39. Маслов А.М. Оборудование для высокотемпературной пастеризации, стерилизации и охлаждения пищевых жидкостей. – Ленинград: Машиностроение, 1967. – 232 с.

40. Машины и аппараты пищевых производств: учебник для вузов в 3 кн. Кн.2.т.2 / С.Т. Антипов и др. Минск: БГАТУ, 2008. 591с.

41. Методика идентификации объекта управления с целью его дальнейшей автоматизации [Электронный ресурс] / С. А. Мокрушин [и др.] // Всероссийская ежегодная научно-практическая конференция «Общество, наука, инновации» (НПК-2013). Общеуниверситетская секция, БФ, ГФ, ФЭМ, ФАВТ, ФАМ, ФПМТ, ФСА, ХФ, ЭТФ : 15-26 апр. 2013 г. : сб. материалов / Вят. гос. ун-т ; отв. ред. С. Г. Литвинцев. – Киров, 2013. – 1 электрон. опт. диск (CD-ROM). – (Факультет автоматики и вычислительной техники. Секция «Оптимизация управления электромеханических систем», ст. 7).

42. Модель системы управления тепловыми процессами [Электронный ресурс] / С. А. Мокрушин, С. И. Охалкин, С. Г. Афанасьев // Всероссийская ежегодная научно-практическая конференция «Общество, наука, инновации» (НПК-2013). Общеуниверситетская секция, БФ, ГФ, ФЭМ, ФАВТ, ФАМ, ФПМТ, ФСА, ХФ, ЭТФ : 15-26 апр. 2013 г. : сб. материалов / Вят. гос. ун-т ; отв. ред. С. Г. Литвинец. – Киров, 2013. – 1 электрон. опт. диск (CD-ROM). – (Факультет автоматики и вычислительной техники. Секция «Оптимизация управления электромеханических систем», ст. 19).

43. Модель технологического процесса стерилизации консервов в промышленном автоклаве [Электронный ресурс] / С.А. Мокрушин // ОБЩЕСТВО, НАУКА, ИННОВАЦИИ. (НПК – 2017): всерос. ежегод. науч.-практ. конф.: сб. статей, 1–29 апреля 2017 г. – Киров: Науч. изд-во ВятГУ, 2017.– 1 электрон. опт. диск (CD-ROM). – с. 1590-1596.

44. Мокрушин С.А. / Проблемы реализации системы регулирования процесса стерилизации консервов [Электронный ресурс] / С. А. Мокрушин, В.С. Хорошавин // Общество, наука, инновации (НПК-2011): ежегод. открыт. всерос. науч.-технич. конф., 18-29 апр. 2011.: сб. материалов / Вят. гос. ун-т; отв. ред. С.Г. Литвинец. – Киров, 2011. – 1 электрон. опт. диск (CD-ROM). (Факультет автоматики и вычислительной техники. Секция «Оптимизация управления электромеханических систем». Статья № 8).

45. Мокрушин С.А. Инженерные методы идентификации статических объектов управления с целью их дальнейшей автоматизации/ С.А. Мокрушин, А.В. Журавлёв, С.В. Кротов, В.П. Теплых // Наука и образование в XXI веке: Сборник научных трудов по материалам Международной научно-практической конференции 30 декабря 2013 г. В 8 частях. Часть V. Мин-во обр. и науки - М.: «АР-Консалт», 2014 г.- с. 55-57.

46. Мокрушин С.А. Система управления процессом стерилизации на основе ПЛК // Естественные и технические науки. – М.: Издательство «Спутник+», 2010 г. - №4 (48). - с. 309-314.

47. Мокрушин С.А. Стерилизация консервной продукции // Автоматизация и производство. – М.: ПО «ОВЕН», 2010 г.- №1'10. – с. 30-31.

48. Мокрушин С.А., Охапкин С.И., Москвин Э.В. Особенности построения системы управления процессом тепловой обработки пищевых продуктов в автоклавах // Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ». Тематическое направление «Автоматизация и управление». – Санкт-Петербург: Издательство СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2015 г. - №10. - с. 45–49.

49. Мокрушин С.А., Охапкин С.И., Хорошавин В.С. Исследование процесса стерилизации консервной продукции с целью дальнейшей автоматизации // Научный журнал НИУ ИТМО. Серия «Процессы и аппараты пищевых производств». 2015. №4. с. 62–72.

50. Мокрушин С.А., Охапкин С.И., Хорошавин В.С., Вахрушев В.Ю. Унификация применения технических средств «ОВЕН» в лабораторных работах на кафедре ЭПиАПУ// Труды VII Международной (VIII Всероссийской) научно-технической конференции по автоматизированному электроприводу (заседание круглого стола: Образовательные технологии по направлению подготовки «Электроэнергетика и электротехника»): ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина». – Иваново, 2012 г., с.671-673.

51. Мокрушин С.А., Хорошавин В.С. Автоматизация процесса стерилизации консервов // «Общество-наука-инновации» Сб. материалов ежег. всероссийской науч.-технич. конф. Том 2 / ВятГУ. – Киров, 2010 г, с.125-127.

52. Мокрушин С.А., Хорошавин В.С., Присмотров Н.И. Исследование автоматической настройки ПИД-регулятора // «Общество-наука-инновации» Сб. материалов ежег. всероссийской науч.-технич. конф. Том 2 / ВятГУ. – Киров, 2010 г, с.116-119.

53. Мокрушин С.А., Хорошавин В.С., Филатова Е.С., Русяева Т.Л. Управление процессами тепловой обработки пищевых продуктов //

Современные проблемы науки и образования. – 2012. – № 6;
URL: <http://www.science-education.ru/106-7935> (дата обращения: 25.12.2012).

54. Мокрушин, С. А. Автоматизация вертикальных автоклавов [Электронный ресурс]/С. А. Мокрушин // Альфа-Пром Киров. - Режим доступа: http://alfa-prom.ru/art_4_aut_vert_avtoklavov.html - Загл. с экрана. (дата обращения: 29.06.2017)

55. Назаров Н.И., Гиизбург А.С., Гребенюк С.М. и др. Общая технология пищевых производств. – М.: Лёгкая и пищевая промышленность, 1981. – 360 с.

56. Обзор и анализ стерилизаторов консервов с целью их дальнейшей автоматизации [Электронный ресурс] / С. А. Мокрушин, В. С. Хорошавин // Всероссийская ежегодная научно-техническая конференция «Общество, наука, инновации» (НТК-2012). Общеуниверситетская секция, БФ, ГФ, ФЭМ, ФАВТ, ФАМ, ФПМТ, ФСА, ХФ, ЭТФ : 16-27 апр. 2012 г. : сб. материалов / Вят. гос. ун-т ; отв. ред. С. Г. Литвинец. – Киров, 2012. – 1 электрон. опт. диск (CD-ROM). - (Факультет автоматики и вычислительной техники. Секция «Оптимизация управления электромеханических систем». Статья № 8).

57. Основы автоматики и автоматизации химических производств: Учебное пособие для вузов/ Казаков А.В., Кулаков М.В., Мелюшев Ю.К. – М.: Машиностроение, 1970 – 376 с.

58. Особенности имитационного моделирования системы автоматического управления теплоэнергетическим объектом [Электронный ресурс] / С. И. Охапкин, С. А. Мокрушин, А. В. Журавлёв // Всероссийская ежегодная научно-практическая конференция «Общество, наука, инновации» (НПК-2014). Общеуниверситетская секция, БФ, ГФ, ФЭМ, ФАВТ, ФАМ, ФПМТ, ФСА, ХФ, ЭТФ, ЮФ : 15-26 апр. 2014 г. : сб. материалов / Вят. гос. ун-т ; отв. ред. С. Г. Литвинец. – Киров, 2014. – 1 электрон. опт. диск (CD-ROM). – Сб. подготовлен при поддержке РФФИ, в рамках научного проекта №14-06-

06003 – (Факультет автоматике и вычислительной техники. Секция «Оптимизация управления электромеханических систем», ст. 1136).

59. Охапкин С.И. К вопросу о методах идентификации теплоэнергетических объектов управления /С.И. Охапкин, С.А. Мокрушин, С.Г. Афанасьев// Научный журнал «Advanced science». – Киров: Издательство «ВятГУ», 2014 г. – №1(4). – с. 10-23.

60. Петров И.В. Программируемые контроллеры. Стандартные языки и инструменты / Под ред. проф. В. П. Дьяконова. — М.: СОЛОН-Пресс, 2003. — 256 с: ил.

61. Пешко М. С. Адаптивная система управления параметрами микроклимата процессов производства и хранения пищевых продуктов: дис. ... канд. техн. наук: 05.13.06 / Пешко Михаил Сергеевич. – Омск, 2015. – 200 с.

62. Пилипенко Н.И., Пелевина Л.Ф. Процессы и аппараты. – М.: Издательский центр «Академия», 2008. – 336 с.

63. Платонов П.Н., Павлов А.И., Сычук Л.М. Автоматика и автоматизация консервного производства. – Киев: Высшая школа, 1981. – 264 с.

64. Построение информационной системы управления на участке стерилизации консервов [Электронный ресурс] / М.В. Ряшин [и др.] // ОБЩЕСТВО, НАУКА, ИННОВАЦИИ. (НПК – 2016): всерос. ежегод. науч.- практ. конф.: сб. статей, 18–29 апреля 2016 г. / Вят. гос. ун-т. – Киров, 2016.– 1 электрон. опт. диск (CD-ROM). – с. 2430- 2435.

65. Разработка и исследование модели объекта в SCADA-системе [Электронный ресурс] / С.А. Мокрушин, [и др.]// ОБЩЕСТВО, НАУКА, ИННОВАЦИИ. (НПК – 2015) : всерос. ежегод. науч.- практ. конф.: сб. материалов, 13–24 апреля 2015 г. / Вят. гос. ун-т. – Киров, 2015. – 1 электрон. опт. диск (CD-ROM). – С. 1357-1361.

66. Реализация алгоритмов, представленных графом функционирования на современных программируемых логических контроллерах с использованием языков программирования стандарта МЭК

61131-3 [Электронный ресурс] / Н.А. Коршунов, Е.Н. Малышев, С.А. Мокрушин // Всероссийская ежегодная научно-практическая конференция «Общество, наука, инновации» (НПК-2013). Общеуниверситетская секция, БФ, ГФ, ФЭМ, ФАВТ, ФАМ, ФПМТ, ФСА, ХФ, ЭТФ: 15-26 апр. 2013 г.: сб. материалов / Вят. гос. ун-т; отв. ред. С.Г. Литвинец. – Киров, 2013.– 1 электрон. опт. диск (CD-ROM). - (Факультет автоматики и вычислительной техники. Секция «Оптимизация управления электромеханических систем» ст. 6)

67. Ривкин С.Л., Александров А.А. Термодинамические свойства воды и водяного пара: Справочник. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 80 с.

68. Рогов И.А., Жаринов А.И. Технология и оборудование мясоконсервного производства. – М.: Пищевая промышленность, 1978. – 260 с.

69. Руководство пользователя по программированию ПЛК в CoDeSys V2.3. – Смоленск: ПК "Пролог", 2004. – 423 с.

70. Руководство по эксплуатации ПЛК154. – М.: ПО «ОВЕН», 2016. – 49 с.

71. Сазонова Т. В. Управление автоклавом на основе многомерного нечеткого регулятора с интервальной неопределенностью: дис. ... канд. техн. наук: 05.13.06 / Сазонова Татьяна Васильевна. – Оренбург, 2013. – 195 с.

72. Сартов Т.Э. Теория автоматического управления. Моделирования САУ: Учебно-методическое пособие по выполнению лабораторных работ/ Т.Э. Сартов. – Бишкек: КГТУ им. И.Раззакова, 2012. – 55 с.

73. Свид. 2017612219 Российская Федерация. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ. Управление процессом стерилизации консервов в автоклаве/ С.А. Мокрушин; заявитель и правообладатель ФГБОУ ВПО «Вятский государственный университет» (RU). - №2016664775; заявл. 30.12.2016; опубли. 17.02.2017, Реестр программ для ЭВМ. – 33 с.

74. Селяков И. Ю. Повышение энергоэффективности процессов конвективного обезвоживания при производстве копчёной и вяленой рыбы:

дис. ... канд. техн. наук: 05.18.12; 05.13.06 / Селяков Илья Юрьевич. – Мурманск, 2015. – 209 с.

75. Симановский А.Ю. Типы регуляторов: Методика настройки регуляторов/ А.Ю. Симановский – Ивано-Франковск: МИКРОЛ, 2011 – 63 с.

76. Современные технологии процесса стерилизации консервов как объекты управления [Электронный ресурс] / С. А. Мокрушин, В. С. Хорошавин // Всероссийская ежегодная научно-техническая конференция «Общество, наука, инновации» (НТК-2012). Общеуниверситетская секция, БФ, ГФ, ФЭМ, ФАВТ, ФАМ, ФПМТ, ФСА, ХФ, ЭТФ : 16-27 апр. 2012 г. : сб. материалов / Вят. гос. ун-т ; отв. ред. С. Г. Литвинец. – Киров, 2012. – 1 электрон. опт. диск (CD-ROM). - (Факультет автоматики и вычислительной техники. Секция «Оптимизация управления электромеханических систем». Статья № 7).

77. Сравнительный анализ методов идентификации объекта управления [Электронный ресурс] / С. А. Мокрушин [и др.] // Всероссийская ежегодная научно-практическая конференция «Общество, наука, инновации» (НПК-2013). Общеуниверситетская секция, БФ, ГФ, ФЭМ, ФАВТ, ФАМ, ФПМТ, ФСА, ХФ, ЭТФ : 15-26 апр. 2013 г. : сб. материалов / Вят. гос. ун-т ; отв. ред. С. Г. Литвинец. – Киров, 2013. – 1 электрон. опт. диск (CD-ROM). – (Факультет автоматики и вычислительной техники. Секция «Оптимизация управления электромеханических систем», ст. 22).

78. Сурган Г.А. Основы автоматизации технологических процессов консервного производства. – М.: Пищевая промышленность, 1973. – 224 с.

79. Трегуб В.Г. Автоматизация периодических процессов в пищевой промышленности. – Киев: Техника, 1982. – 160 с.

80. Фёдоровский Л.М., Чижов А.А. Сборник упражнений и задач по автоматическому регулированию и регуляторам в пищевой промышленности. – М.: Пищевая промышленность, 1979. – 127 с.

81. Флауменбаум Б.Л. Теоретические основы стерилизации консервов: учебное пособие для вызов –2-е изд., испр. и доп.– Киев: Высшая школа, 1981. –196 с.

82. Флауменбаум Б.Л., Танчев С.С., Гришин М.А. Основы консервирования пищевых продуктов. – М.: Агропромиздат, 1986. – 49 с.
83. Харченко В. Ю. Математическое моделирование и оптимальное управление процессом тепловой обработки силикатного кирпича в промышленных автоклавах: дис. ... канд. техн. наук: 05.13.06 / Харченко Владимир Юрьевич. – Тамбов, 2001. – 142 с.
84. Черных И.В. SIMULINK: среда создания инженерных приложений/ под общ. ред. к.т.н. В.Г.Потемкина. – М.: ДИАЛОГ-МИФИ, 2003. – 496 с.
85. Шеннон Р. Имитационное моделирование систем – искусство и наука. – М.: Мир, 1978. – 418 с.
86. Щёкин Б.Е. Разработка и исследование системы автоматического управления для стерилизации консервов: дис.... канд. техн. наук: 05.13.06 – Краснодар, 1975. – 166 с.
87. Щербаков В.С., Руппель А.А., Глушеч В.А. Основы моделирования систем автоматического регулирования и электротехнических систем в среде Matlab и Simulink: Учебное пособие. – Омск: Изд-во СибАДИ, 2003. – 160 с.
88. Ястребов С.М. Технологические расчёты по консервированию пищевых продуктов. – М.: Лёгкая и пищевая промышленность, 1981. – 200 с.
89. Ястребов С.М., Массовер А.М. Стерилизация консервов. – М.: Пищепромиздат, 1961. – 67 с.
90. Barbosa-Cánovas G. V., Juliano P. Food sterilization by combining high pressure and thermal energy //Food engineering: Integrated approaches. – Springer, New York, NY, 2008. – С. 9-46.
91. Farid M., Ghani A. G. A. A new computational technique for the estimation of sterilization time in canned food //Chemical Engineering and Processing: Process Intensification. – 2004. – Т. 43. – №. 4. – С. 523-531.
92. Ghani A. G. A. et al. Thermal sterilization of canned food in a 3-D pouch using computational fluid dynamics //Journal of Food Engineering. – 2001. – Т. 48. – №. 2. – С. 147-156.

93. Gonçalves E. C. et al. Modeling sterilization process of canned foods using artificial neural networks //Chemical Engineering and Processing: Process Intensification. – 2005. – T. 44. – №. 12. – C. 1269-1276.

94. Hiddink J. Natural convection heating of liquids, with reference to sterilization of canned food. – Centre for Agricultural Publishing and Documentation Pudoc, 1975.

95. Llave Y. A., Hagiwara T., Sakiyama T. Artificial neural network model for prediction of cold spot temperature in retort sterilization of starch-based foods //Journal of Food Engineering. – 2012. – T. 109. – №. 3. – C. 553-560.

96. Miri T. et al. Global optimization of process conditions in batch thermal sterilization of food //Journal of food engineering. – 2008. – T. 87. – №. 4. – C. 485-494.

97. Pikina, G.A., Pashchenko, F.F., Pashchenko, A.F. Methods to improve accuracy of typical controllers based on predictive algorithms. // Proceed-ings of the 2013 IEEE 8th Conference on Industrial Electronics and Appli-cations, ICIEA 2013, pp. 613-616.

98. Shahsavand A., Nozari Y. Simulation of a continuous thermal sterilization process in the presence of solid particles //Scientia Iranica. Transaction C, Chemistry, Chemical Engineering. – 2009. – T. 16. – №. 1. – C. 29.

99. Silva C. et al. Optimal sterilization temperatures for conduction heating foods considering finite surface heat transfer coefficients //Journal of food science. – 1992. – T. 57. – №. 3. – C. 743-748.

100. Siritwattanayotin S. et al. Simulation of sterilization of canned liquid food using sucrose degradation as an indicator //Journal of Food Engineering. – 2006. – T. 73. – №. 4. – C. 307-312.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

(обязательное)

Схемы моделирования с подставленными числовыми значениями

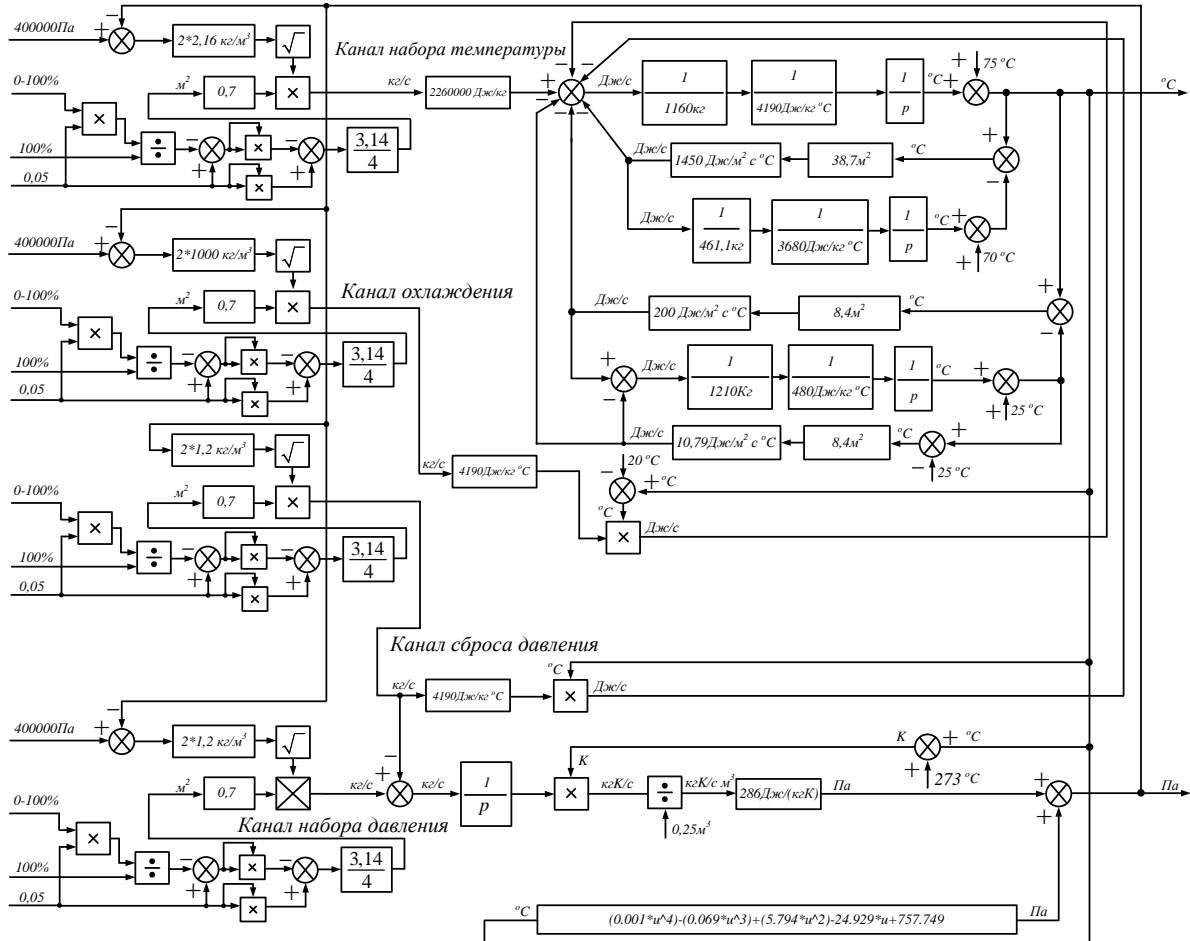


Рисунок А.1 - Схема модели автоклава с подставленными в неё числовыми значениями

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

(обязательное)

Таблицы расчета относительной погрешности

Таблица Б.1 – Проверка адекватности математической модели изменения температуры (рисунок 2.11) в режиме нагрева и охлаждения автоклава

Время измерения t, с	Реальное значение технологического параметра A, °C	Смоделированное значение технологического параметра a, °C	Абсолютной погрешности $\Delta a = A - a $, °C	Относительная погрешность $\delta a = \frac{\Delta a}{ a } \cdot 100\%$
0	74	75	1	1,3
50	100	104	4	3,8
100	122	127	5	3,9
150	135	141	6	4,2
200	-	149	-	-
250	-	150	-	-
300	-	150	-	-
350	70	67	3	4,4
400	38	37	1	2,7
450	27,5	27	0,5	2
500	22,5	23	0,5	2
550	21,8	22	0,2	1
600	21,5	21	0,5	2

Таблица Б.2 – Проверка адекватности математической модели изменения давления $P_{АВТ}$ (рисунок 2.11) в режиме нагрева и охлаждения автоклава

Время измерения t, с	Реальное значение технологического параметра A, кПа	Смоделированное значение технологического параметра a, кПа	Абсолютной погрешности $\Delta a = A - a $, кПа	Относительная погрешность $\delta a = \frac{\Delta a}{ a } \cdot 100\%$
0	33	34	1	2,9
50	97	100	3	3
100	200	206	6	2,9
150	310	320	10	3,1
200	-	387	-	-
250	-	399	-	-
300	-	399	-	-
350	27	25	1	4
400	6,3	6	0,3	5
450	4,2	4	0,2	5
500	3,1	3	0,1	3,3
550	2,35	2,3	0,05	2,17
600	2,05	2	0,05	2,5

Таблица Б.3 – Проверка адекватности математической модели изменения давления P_{ABT} в автоклаве (рисунок 2.12) при подаче и сбросе сжатого воздуха

Время измерения t, с	Реальное значение технологического параметра A, кПа	Смоделированное значение технологического параметра a, кПа	Абсолютной погрешности $\Delta a = A - a $, кПа	Относительная погрешность $\delta a = \frac{\Delta a}{ a } \cdot 100\%$
0	33	34	1	3
0,5	220	230	10	4,34
1	335	350	15	4,28
1,5	-	399	-	-
2	-	399	-	-
2,5	-	399	-	-
3	-	399	-	-
3,5	200	193	7	3,6
4	63	60	3	5
4,5	3,1	3	0,1	3,3
5	0,82	0,81	0,01	1,2
5,5	0,81	0,8	0,01	1,25
6	0,72	0,7	0,02	2,86

ПРИЛОЖЕНИЕ В

(обязательное)

Структурная схема системы автоматического управления с контролем показаний теплоносителя

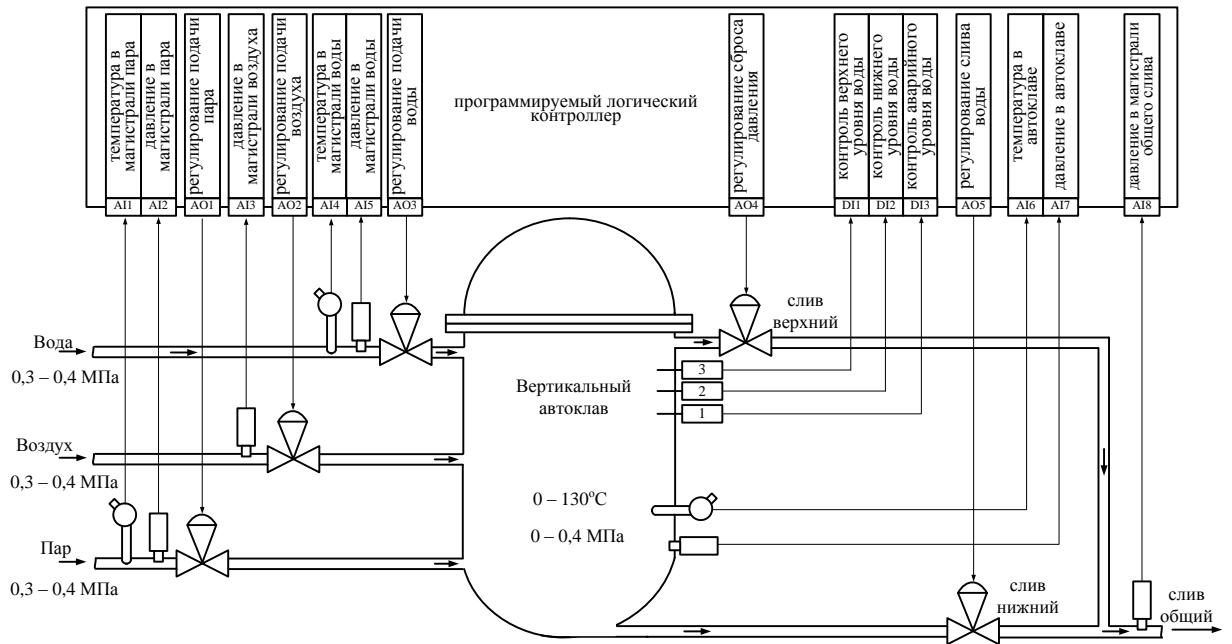


Рисунок В.1 - Схема системы автоматического управления технологическим процессом стерилизации консервов в промышленном автоклаве с контролем показаний теплоносителя

ПРИЛОЖЕНИЕ Г

(обязательное)

Акты о внедрении

«УТВЕРЖДАЮ»

директор



И.О. Консервный завод « Росинка »

/ Чеглаков И.А. /

АКТ О ВНЕДРЕНИИ

результатов диссертационной работы С.А. Мокрушина

Мы, нижеподписавшиеся представители Вятского государственного университета и Консервного завода « Росинка », составили настоящий акт в том, что при модернизации системы автоматического управления процессом стерилизации в вертикальных автоклавах Б-6-КА2-В-2 использовались принципы управления, методы расчета и наладки регуляторов, а так же структура системы автоматического управления, предложенные в диссертации Мокрушина Сергея Александровича.

Разработанная система имеет высокую надёжность, позволяет исключить брак продукции и имеет все необходимые защитные блокировки. Применение системы позволило повысить производительность оборудования и качество выпускаемой продукции. Система надёжна и удобна в эксплуатации, имеет развитую систему диагностики и сигнализации, а так же возможность архивации и отображения информации о технологическом процессе на персональном компьютере.

Разработанная система внедрена и отлажена на автоклавах №1, №2 и №3 и успешно эксплуатируются с марта 2016 г. на Консервном заводе «Росинка». Адрес: г. Яранск, ул. Карла Маркса 138, Кировская область.

Дата подписания акта о внедрении 17 января 2018 года.

Председатель комиссии:

Главный механик
Консервного завода « Росинка »

/ Винокуров С.Ю. /

Члена комиссии:

Главный технолог
Консервного завода « Росинка »

/ Дербенёва Г.С. /

От Вятского государственного
университета
зав. кафедры ЭП и АПУ

/ Ошапкин С.И./

УТВЕРЖДАЮ:



Проректор по образованию

ФГБОУ ВО «ВятГУ»

С. В. Никулин

2018 г.

АКТ О ВНЕДРЕНИИ

в учебный процесс кафедры Электропривода и автоматизации промышленных установок ФГБОУ ВО «ВятГУ» результатов диссертационной работы Мокрушина С.А., связанные с разработкой и исследованием автоматизированной системы управления технологическим процессом стерилизации консервов в промышленном автоклаве, представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.13.06 – Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами (промышленность).

Комиссия кафедры ЭПиАПУ в составе:

Охапкин СИ., к.т.н., доцент, зав. кафедрой;

Грудинин В.С., к.т.н., доцент;

Малышев Е.Н., к.т.н., доцент;

настоящим актом подтверждаем, что результаты диссертационной работы Мокрушина С.А., связанные с разработкой и исследованием автоматизированной системы управления технологическим процессом стерилизации консервов в промышленном автоклаве используются в учебном процессе подготовки бакалавров по направлениям 13.03.02 «Электротехника и электроэнергетика» и 15.03.06 «Мехатроника и робототехника», а именно поставлены лабораторные работы и созданы их учебно-методическое обеспечение по дисциплинам «Автоматизация технологических процессов», «Управление процессами» и «Электрические и компьютерные измерения».

Охапкин СИ.

Грудинин В.С.

Малышев Е.Н.

ПРИЛОЖЕНИЕ Д

(обязательное)

Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2017612219

Управление процессом стерилизации консервов в автоклаве

Правообладатель: *федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Вятский государственный университет» (ВятГУ) (RU)*

Автор: *Мокрушин Сергей Александрович (RU)*

Заявка № **2016664775**

Дата поступления **30 декабря 2016 г.**

Дата государственной регистрации
в Реестре программ для ЭВМ **17 февраля 2017 г.**

*Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности*

 *Г.П. Ивлиев*

