

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)

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Москва – 2019

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Московский государственный университет пищевых производств»

Научный руководитель: Благовещенский Иван Германович
доктор технических наук,
ФГБОУ ВО «Московский государственный университет пищевых производств»,
директор института информационных технологий,
автоматизации и робототехники

Официальные оппоненты: Шкапов Павел Михайлович
доктор технических наук, профессор,
Национальный исследовательский университет
«Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана», заведующий кафедрой «Теоретическая механика»

Бунеев Алексей Владимирович
кандидат технических наук
ООО «Омрон Электроникс», менеджер по работе с целевыми отраслями. Пищевая промышленность.

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Калининградский государственный технический университет»

Защита диссертации состоится «27» июня 2019 г. в 10 часов на заседании диссертационного совета Д212.148.02 в ФГБОУ ВО «Московский государственный университет пищевых производств» по адресу: 109316, г. Москва, ул. Талалихина, дом 33, конференц-зал.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Московский государственный университет пищевых производств» по адресу: 125080, г. Москва, Волоколамское шоссе, д. 11 и на сайте ФГБОУ ВО «МГУПП» <http://mgupp.ru>.

Отзывы на автореферат и диссертацию отправлять по адресу: 125080, г. Москва, Волоколамское шоссе, д. 11. ФГБОУ ВО «МГУПП»

Автореферат разослан «___» _____ 2019 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д212.148.02
доктор технических наук, профессор

Жиров Михаил Вениаминович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

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 прогрессивного, 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 так же 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 исследуются 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, система технических требований и ограничений, необходимые для рационального решения задач автоматического управления технологическим процессом стерилизации консервов в промышленном автоклаве.

2. Предложена 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 друг на друга управляющих координат.

5. 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.

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 автоматизированной системы 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.

ОСНОВНЫЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** диссертации обоснована актуальность темы, сформулированы цели и задачи исследования, выделены объект и предмет исследования, приведены методы исследования, научная новизна, практическая значимость исследования и основные положения, выносимые на защиту.

В **первой главе** произведён анализ современного состояния консервной промышленности в России. Установлено, что одним из перспективных направлений развития консервной промышленности является совершенствование технологического процесса стерилизации консервов.

Представлены основные сведения о технологическом процессе стерилизации консервов и виды процесса стерилизации. Рассмотрен самый распространённый способ стерилизации консервов в промышленности – тепловая обработка продукта в автоклавах. Выделены особенности процесса: стадийность, управление двумя взаимосвязанными параметрами и использование для их регулирования четырёх взаимосвязанных каналов управления.

Обозначены основные направления совершенствования данного процесса стерилизации, среди которых можно выделить рациональный выбор оборудования и создание на его основе эффективной системы автоматического управления технологическим процессом стерилизации консервов.

Произведён анализ оборудования для стерилизации консервов, выявивший их недостатки. Обзор стерилизационных установок выявил низкую степень внедрения средств автоматизации. Выполнен сравнительный анализ, как существующих систем управления технологическим процессом стерилизации консервов, так и самих установок для стерилизации консервов. Определено, что современный технический уровень систем управления стерилизационными установками не способен обеспечить сразу все критерии, которым должна соответствовать система автоматического управления процессом стерилизации. К критериям относятся следующие показатели: точность ведения процесса по температуре и по времени, поддержание противодавления в автоклаве с заданной точностью, возможность быстрого перехода на стерилизацию новой продукции, универсальность системы управления к типу аппарата, простота в обслуживании, надёжность и низкая стоимость.

Обоснована необходимость разработки, выполнен структурный синтез 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.

Во **второй главе** математически описаны связи параметров технологического процесса стерилизации консервов в автоклаве Б6-КАВ-2 с

управляющими воздействиями и возмущениями. Изменение температуры в автоклаве Θ_{ABT} представлено в виде уравнения баланса тепловой энергии:

$$g_{ПАР}r + g_{XB}c_B(\Theta_{XB} - \Theta_B) - g_{СЛ}\Theta_Bc_B - q_{ПОТ} - q_B - q_K = m_Bc_B \frac{d\Theta_B}{dt}, \quad (1)$$

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);

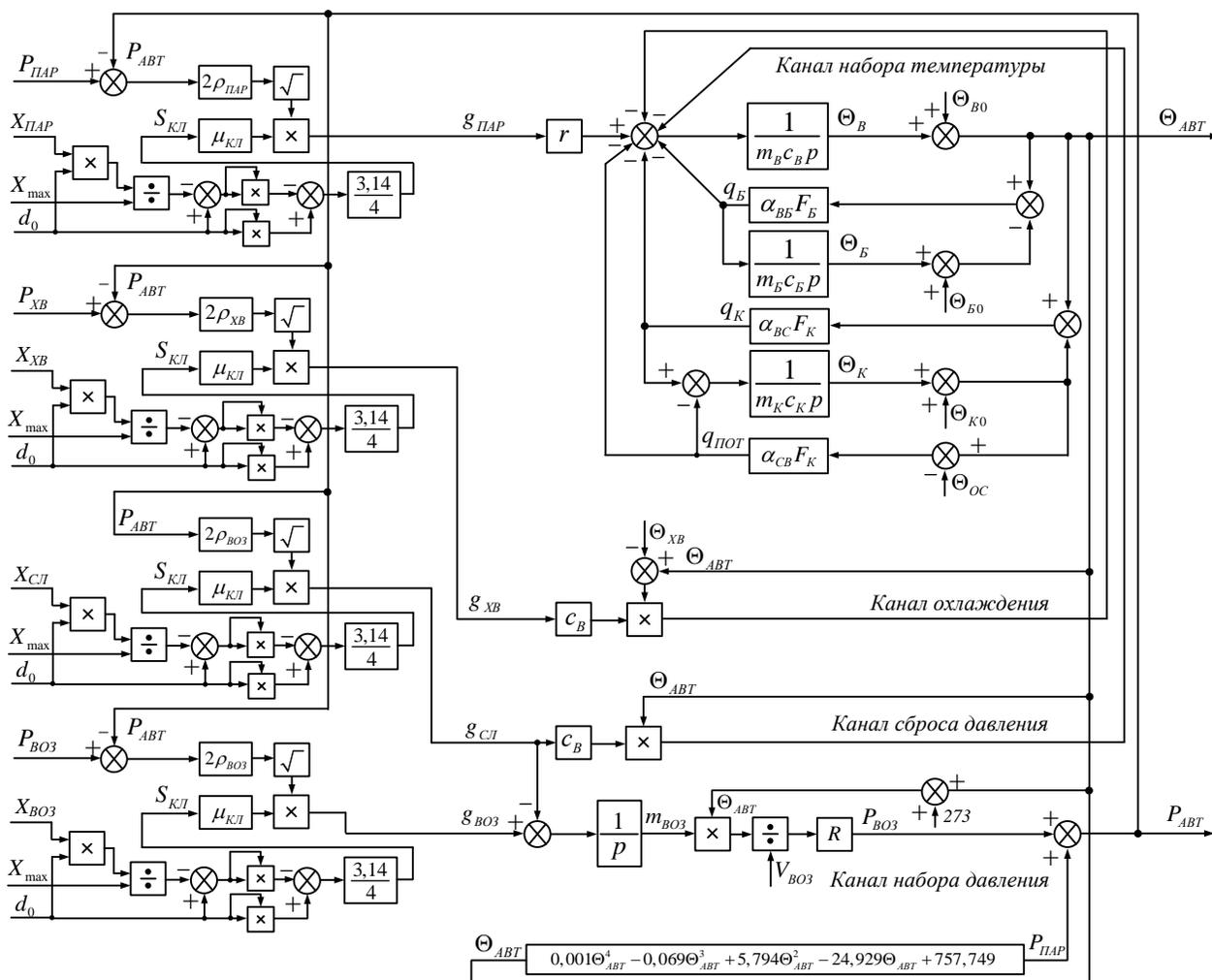
m_B – масса воды в автоклаве, кг.

Давление в автоклаве P_{ABT} , Па определяется двумя слагаемыми: парциальным давлением насыщенного водяного пара $P_{ПАР}$, Па и парциальным давлением воздуха $P_{ВОЗ}$, Па:

$$P_{ABT} = P_{ПАР} + P_{ВОЗ}. \quad (2)$$

Разработана математическая модель технологического процесса стерилизации консервов в автоклаве Б6-КАВ-2 при паровом способе нагрева в воде с противодавлением в виде структуры и описания динамических свойств передаточными функциями (рисунок 1). Особенностью модели является учет многосвязности объекта управления и более полный учет внешних возмущений. Созданы предпосылки к разработке эффективных стерилизационных установок для малых предприятий и крупных производств, а также совершенствования существующих стерилизационных аппаратов с использованием разработанной математической модели. Предложенная математическая модель реализована на ЭВМ с использованием программного средства MATLAB в приложении Simulink (рисунок 3) и может быть использована при исследовании различных вариантов построения системы автоматического управления, являясь более полной по сравнению с моделями, полученными другими исследователями.

Исследования, проведенные на имитационной модели, показали адекватность результатов моделирования графикам, полученным экспериментально на производстве (уровень отклонений не превысил 5%).



Θ_B – температура банок, °C; Θ_{OC} – температура окружающей среды, °C; Θ_K – температура корпуса автоклава, °C; F_B – площадь внешних поверхностей всех банок, м²; F_K – площадь поверхности корпуса автоклава, м²; m_B – масса банок, кг; m_K – масса корпуса автоклава, кг; c_B – удельная теплоёмкость банок с продуктом, Дж/(кг·°C); c_K – удельная теплоёмкость корпуса автоклава, Дж/(кг·°C); α_{BB} – коэффициент теплоотдачи вода-банка, Дж/(м²·с·°C); α_{BC} – коэффициент теплоотдачи вода-сталь, Дж/(м²·с·°C); α_{CB} – коэффициент теплоотдачи сталь-воздух, Дж/(м²·с·°C); $g_{ВОЗ}$ – массовый расход воздуха через регулирующий клапан, кг/с; $V_{ВОЗ0}$ – начальный объём воздуха в автоклаве, м³; R – газовая постоянная, Дж/(кг·K); $\mu_{КЛ}$ – коэффициент расхода клапана; $P_{ПАР}$ – давление в магистрали пара, Па; $P_{ХВ}$ – давление в магистрали холодной воды, Па; $P_{ВОЗ}$ – давление в магистрали воздуха, Па; ρ – плотность среды, кг/м³; $S_{КЛ}$ – площадь проходного сечения клапана, м²; X – сигнал управления регулирующим клапаном, % хода регулирующего органа, d_0 – диаметр проходного сечения, м.

Рисунок 1 – Структурная схема математической модели технологического процесса стерилизации консервов в автоклаве

В третьей главе предложена математическая модель системы автоматического управления технологическим процессом в промышленном автоклаве (рисунок 2), выполняющая регулирование температуры и давления на этапе нагрева, собственно стерилизации и охлаждения, и учитывающая связь между этими двумя параметрами.

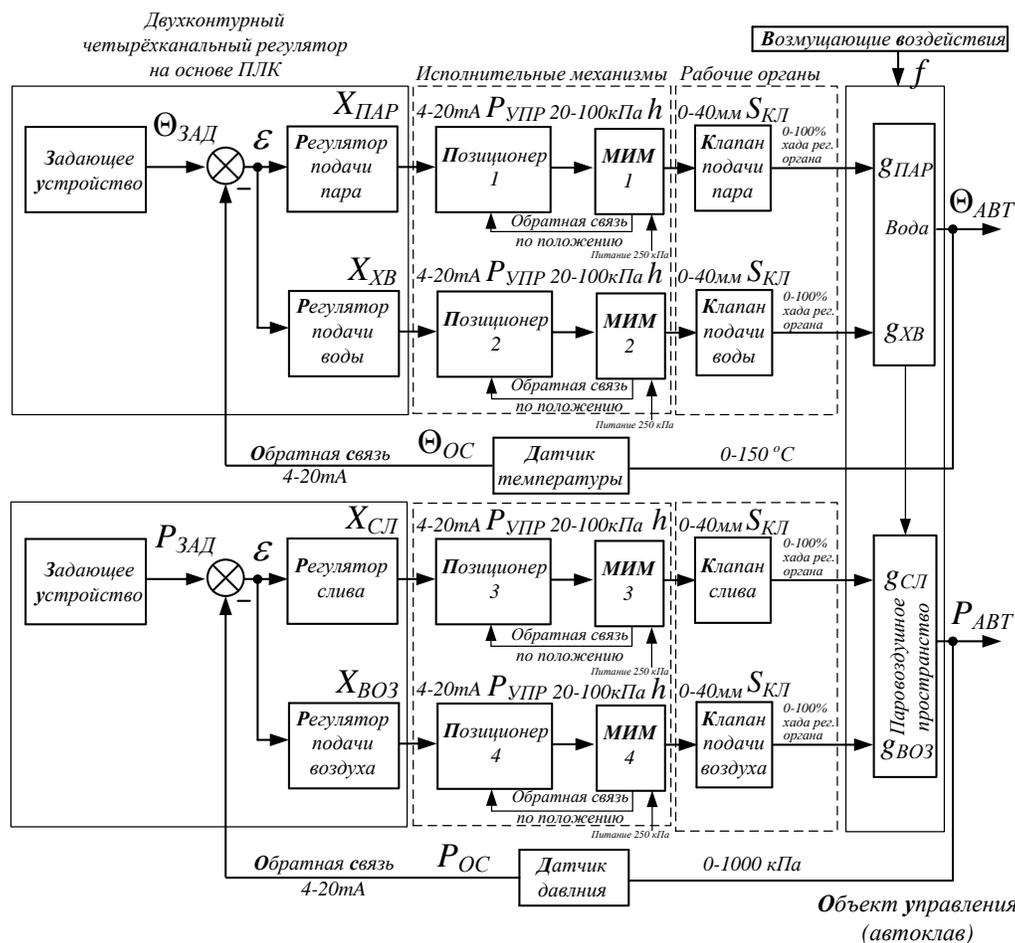


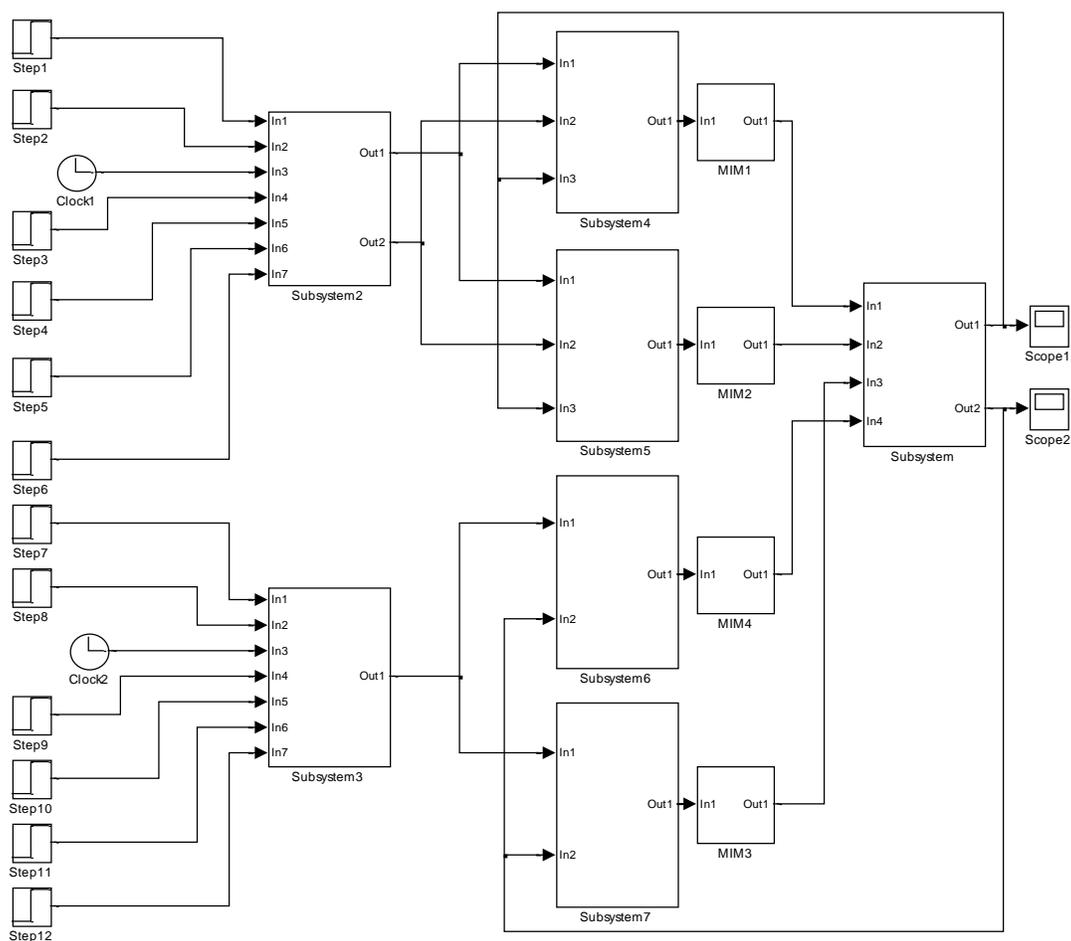
Рисунок 2 - Структурная схема системы автоматического управления технологическим процессом стерилизации консервов в промышленном автоклаве

Реализованная в Simulink система программного управления параметрами технологического процесса выполняет раздельное включение по стадиям процесса регуляторов в контуре управления температуры и одновременную работу регуляторов в контуре управления давлением (рисунок 3).

Доказана целесообразность использования для автоматизации алгоритмов ПИ-регулирования обеспечивающих поддержание температуры с точностью 0,01 °C и алгоритмов П – регулирования, обеспечивающих регулирование давления с точностью 0,3 кПа на всех стадиях процесса стерилизации консервов в автоклаве, как наиболее соответствующих рассматриваемому случаю. Расчёт коэффициентов

регуляторов выполнен графоаналитическим методом по кривым разгона. Всё это обеспечило настройку системы на переходный процесс с требуемыми показателями качества процесса регулирования.

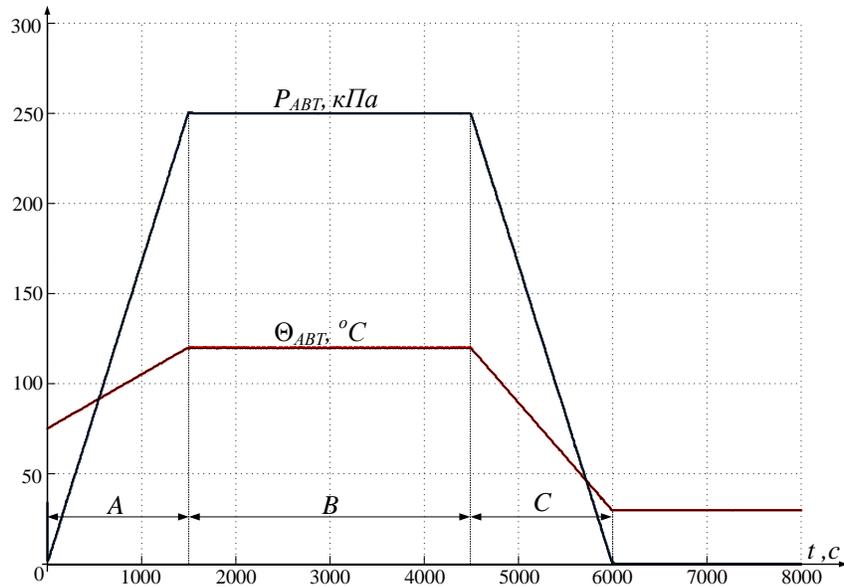
Моделированием доказано (рисунок 4), что система автоматического управления с выбранными типами регуляторов не требует дополнительного алгоритма переключения коэффициентов регулятора температуры и давления при переходе с одной стадии технологического процесса на другую. Рассчитанные коэффициенты позволяют обеспечить заданные показатели качества процесса регулирования на всех трёх стадиях технологического процесса (нагрев, стерилизация и охлаждение).



Subsystem – объект управления (автоклав); MIM1, MIM2, MIM3, MIM4 – мембранный исполнительный механизм; Subsystem2 – программное задающее устройство температуры; Subsystem3 – программное задающее устройство давления; Subsystem4 – регулятор подачи пара; Subsystem5 – регулятор подачи воды; Subsystem6 – регулятор подачи воздуха; Subsystem7 – регулятор сброса давления.

Рисунок 3 - Модель системы автоматического управления технологическим процессом стерилизации консервов в промышленном автоклаве в виде подсистем Simulink

Система управления настроена на переходной процесс с минимальной квадратичной площадью отклонения, что позволяет реализовать регулирование без колебаний и перерегулирования. Это, в свою очередь, способствует уменьшению расхода энергии и тем самым повышает энергоэффективность технологического процесса. При этом полностью соблюдаются требования к качеству процесса регулирования по быстродействию и точности. Качество регулирования проверено путём анализа прямых показателей качества процесса регулирования.



A – время нагревания; B – время стерилизации; C – время охлаждения

Рисунок 4 – Графики регулирования температуры при использовании ПИ - регуляторов и давления при использовании П - регуляторов в процессе стерилизации

Особенностью предложенной системы автоматического управления является полная компенсация ею внешних возмущений, связанных с изменением параметров пара, воды и воздуха в подающих трубопроводах.

Предложенный метод решения задачи автоматического управления процессом стерилизации консервов носит универсальный характер и может быть использован для разработки подобной системы автоматического управления процессом стерилизации в аппаратах схожей конструкции и принципа действия.

В четвёртой главе, опираясь на результаты проведенных исследований, разработан алгоритм управления (рисунок 5) и создан программно-аппаратный комплекс автоматического управления процессом стерилизации консервов (рисунок 6), который является более универсальным по сравнению с системами управления, полученными другими исследователями.

Предложенный алгоритм работы программно-аппаратного комплекса для управления процессом стерилизации консервов в промышленном автоклаве, дополнительно включает реализацию в автоматическом режиме подготовительных операций, предшествующих основному режиму стерилизации консервов, а также алгоритм предупреждения аварийных ситуаций в процессе регулирования.

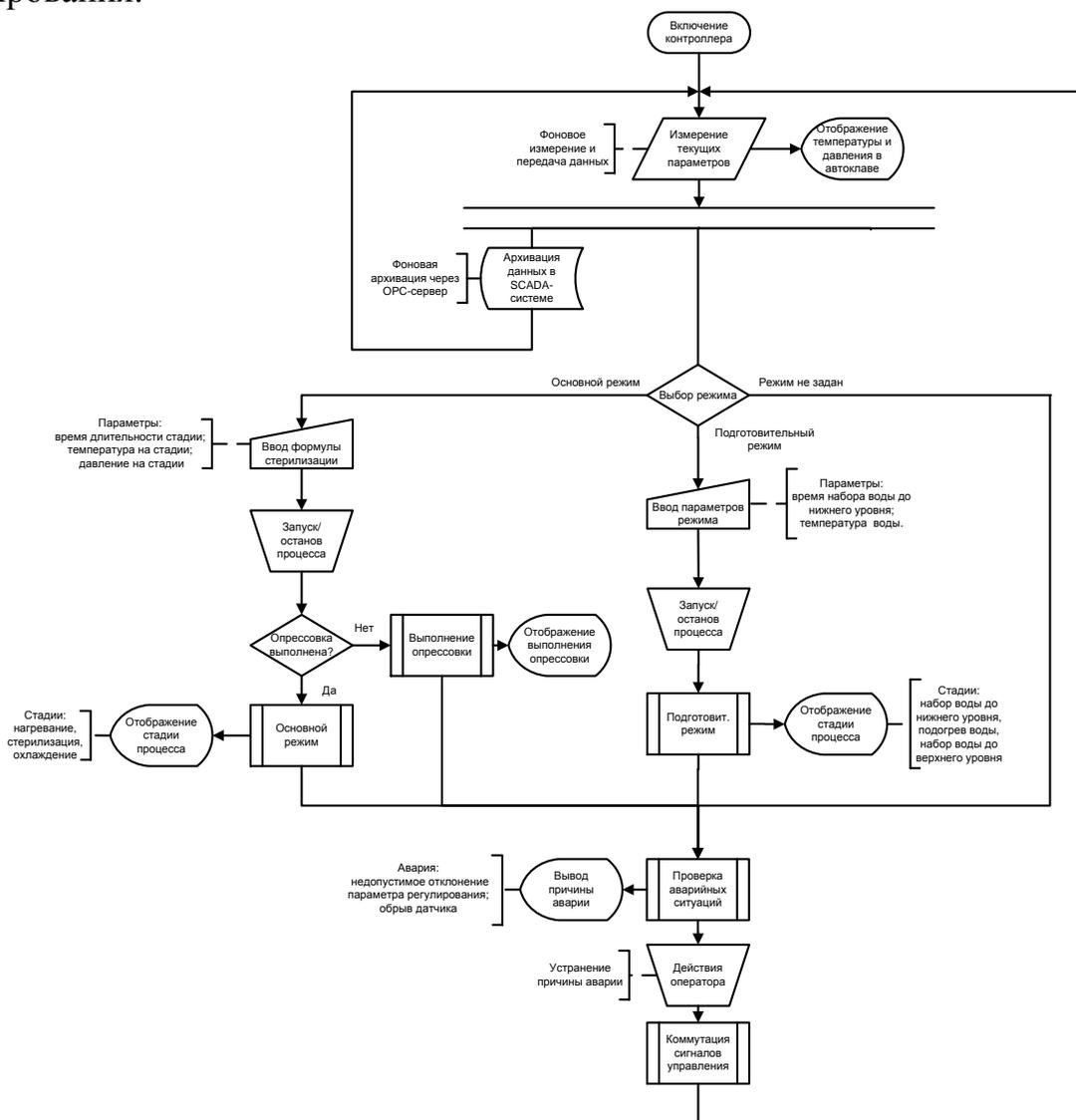
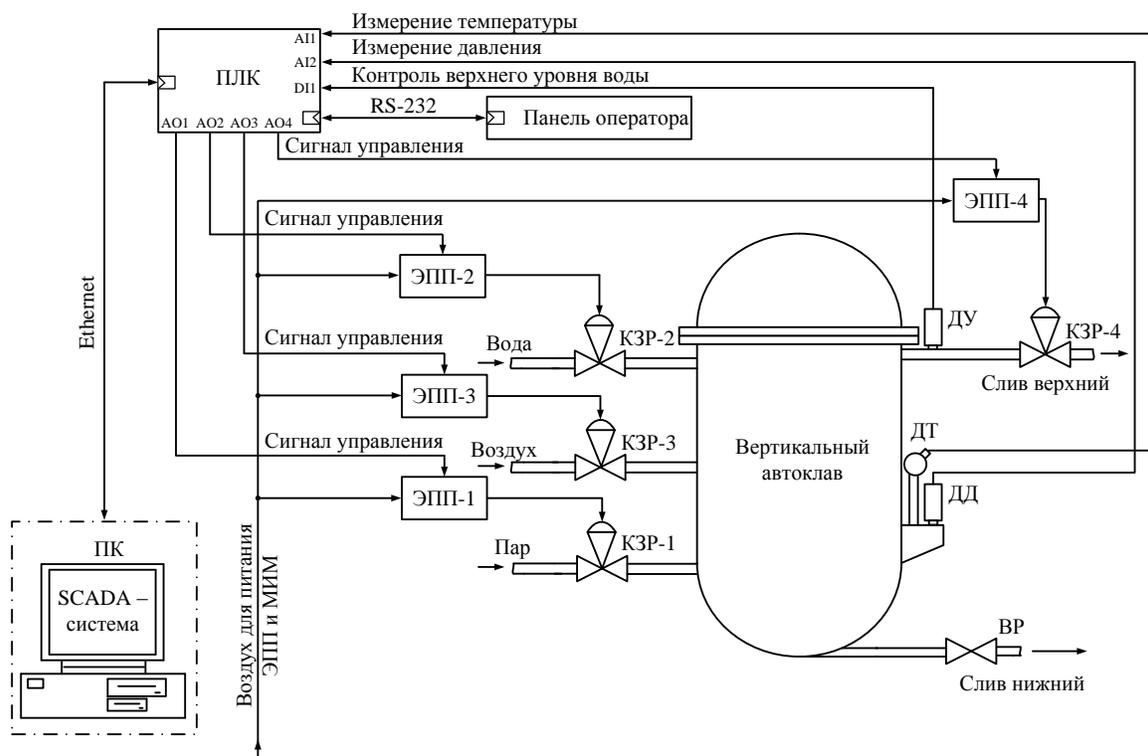


Рисунок 5 - Алгоритм работы программно-аппаратного комплекса

Особенностью разработанного комплекса управления промышленным автоклавом является программная реализация двухконтурного четырёхканального регулятора с применением классических законов автоматического регулирования, что позволяет реализовать требуемые показатели качества технологического процесса.

Представленная структура системы автоматического управления процессом стерилизации в автоклаве (рисунок 6) практически реализована на элементах автоматики ПО «ОВЕН». Система включает в себя как элементы управления технологическим процессом, так и элементы создания человеко-машинного интерфейса, образующие информационную среду комплекса. Разработка включает в себя аппаратные средства и программное обеспечение.



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 6 – Схема системы автоматического управления технологическим процессом стерилизации консервов в автоклаве, реализованная в виде программно аппаратного комплекса

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 проведённых исследований 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.

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 [1,2,3,4,6,7,9,10,11,12,24,25], разработана техническая документация на создание программно-аппаратного комплекса, написана программа работы ПЛК, предложена конфигурация экранов панели оператора и SCADA-системы.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК

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

2. 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).

3. Мокрушин С.А., Охалкин 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.

4. Мокрушин С.А., Охалкин 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.

Публикации в других изданиях

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

6. 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.

7. 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.

8. Мокрушин С.А. / Проблемы реализации системы регулирования процесса стерилизации консервов [Электронный ресурс] / С. А. Мокрушин, В.С. Хорошавин // Общество, наука, инновации (НТК-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).

9. 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).

10. 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).

11. 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 автоматики и вычислительной техники. Секция «Оптимизация управления электромеханических систем». Статья № 9).

12. 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 автоматики и вычислительной техники. Секция «Оптимизация управления электромеханических систем». Статья № 6).

13. 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.

14. Мокрушин С.А., Охупкин 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.

15. 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)

16. 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).

17. 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. Литвинец. – Киров, 2013. – 1 электрон. опт. диск (CD-ROM). – (Факультет автоматики и вычислительной техники. Секция «Оптимизация управления электромеханических систем», ст. 7).

18. Модель системы управления тепловыми процессами [Электронный ресурс] / С. А. Мокрушин, С. И. Охапкин, 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).

19. 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

20. 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 автоматики и вычислительной техники. Секция «Оптимизация управления электромеханических систем», ст. 1136).

21. 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.

22. 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.

23. 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.

24. 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.

Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ

25. 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; опубл. 17.02.2017, Реестр программ для ЭВМ. – 33 с.