

На правах рукописи



АНТОНОВ СЕРГЕЙ ВАЛЕРЬЕВИЧ

**РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ И АЛГОРИТМОВ
АВТОМАТИЗИРОВАННОГО КОНТРОЛЯ
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ
ПРОИЗВОДСТВА ВАФЕЛЬ
НА ОСНОВЕ ЦИФРОВОГО ДВОЙНИКА**

Научная специальность 2.3.3 — Автоматизация и управление
технологическими процессами и производствами

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва — 2025

Работа выполнена на кафедре промышленной информатики Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «МИРЭА - Российский технологический университет».

Научный руководитель: **Холопов Владимир Анатольевич,** кандидат технических наук, доцент, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «МИРЭА - Российский технологический университет», заведующий кафедрой «Промышленная информатика»

Официальные оппоненты: **Хаустов Игорь Анатольевич,** доктор технических наук, профессор, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Воронежский государственный университет инженерных технологий», профессор, заведующий кафедрой «Информационные и управляющие системы»

Копейкин Роман Евгеньевич, кандидат технических наук, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)», доцент кафедры «Автономные информационные и управляющие системы»

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Российский государственный университет им. А.Н. Косыгина (Технологии. Дизайн. Искусство)»

Защита состоится «02» декабря 2025 г. в 12.00 час. на заседании диссертационного совета 24.2.334.01 по защите докторских и кандидатских диссертаций на базе ФГБОУ ВО «Российский биотехнологический университет (РОСБИОТЕХ)» по адресу: 109316, г. Москва, ул. Талалихина, д.33, конференц-зал.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «РОСБИОТЕХ» и на сайте <http://www.mgupp.ru>.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные гербовой печатью, просим направлять по адресу: 125080, г. Москва, Волоколамское шоссе, д. 11.

Автореферат разослан «___» _____ 2025 г.

Ученый секретарь диссертационного совета 24.2.334.01,
кандидат технических наук, доцент

 Полевщиков И.С.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы.

Современное развитие производства характеризуется набором тенденций.

Стратегии трансформации и развития производств строятся в соответствии с российскими государственными программами цифровизации и развития промышленности, такими как проект «Умное производство» в рамках стратегического направления в области развития обрабатывающих отраслей промышленности на основе распоряжения Правительства Российской Федерации от 7 ноября 2023 г. № 3113-р, национальная программа «Цифровая экономика» и другими.

Для повышения конкурентоспособности производств, обеспечения эффективного сбора данных и разработки новых технологических процессов и модернизации действующих практикуется использование на этих предприятиях перспективных информационных технологий.

Сформировалась тенденция на производство кастомизированной продукции и, как следствие, одновременную реализацию нескольких технологических процессов в рамках одного производства, которая приводит к расширению номенклатуры, количества рецептов и ассортимента выпускаемой продукции и более качественному удовлетворению спроса клиентов.

Производство вафель является примером многорецептурного производства, где на основе целого набора рецептов реализуется несколько технологических процессов. Технологический процесс производства вафель характеризуется тем, что на качество продукта влияет множество технологических параметров, собираемых несистематизировано и несвязано, не в едином информационном пространстве и не имеющих чётко формализованных связей. В свою очередь, эти параметры подвержены влиянию человеческого фактора, заключающегося в выборе технологами конкретных рецептов и настроек оборудования в зависимости от текущих производственных условий и параметров сырья.

Необходимость выпускать тестовые партии, обозначенные выше тенденции и высокий уровень издержек при производстве вафель, позволяют утверждать, что мониторинг и контроль технологических процессов на таком производстве имеет недостаточно высокую эффективность в современных условиях, а эта проблема актуальна и нуждается в научной проработке.

Тему производственного мониторинга и контроля следует считать хорошо проработанной. Среди авторов научных работ, занимавшихся данной тематикой, можно отметить Благовещенского И.Г., Веинбергера Н., Джуанга К., Клепикова С.И., Мокрушина С.А., Пуша А.В., Сидорова А.С., Славянова А.С., Тихомирова В.В., Холопова В.А., Черных В.Я., Ягьева Э.Э. и других. Темой применения современных информационных технологий и цифровых двойников на производстве занимались Благовещенский И.Г., Благовещенская М.М., Боровков А.И., Гданский Н.И., Краснов А.Е., Красинский А.Я., Мартинов В.Г., Прохоров А., Рот А., Шваб К., Шеде Г., Шеффер Э. и другие. Производство вафель подробно рассмотрено в работах Алёшиной Ю.А., Савенковой Т.В., Старшова Д.Г., Лейберовой Т.В., Тамазовой

С.Ю. и других.

Несмотря на наличие большого числа публикаций, посвящённых мониторингу и контролю технологических процессов, на сегодняшний день не полностью решены проблемы технологического процесса производства вафель, которые связаны с эффективностью сбора данных, контролем технологических процессов, организацией и мониторингом единого информационного пространства, постадийного мониторинга жизненного цикла производимых изделий для решения задач проектирования и модернизации технологических процессов.

Изложенное выше позволяет сделать вывод об актуальности диссертационного исследования по теме «Разработка методов и алгоритмов автоматизированного контроля технологических процессов производства вафель на основе цифрового двойника».

Соответствие паспорту специальности.

Диссертационная работа и её научная новизна соответствуют паспорту специальности 2.3.3 «Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами» по её областям исследований: № 2 (автоматизация контроля и испытаний), № 8 (научные основы, модели и методы идентификации производственных процессов, комплексов и интегрированных систем управления и их цифровых двойников), № 11 (методы создания, эффективной организации и ведения специализированного информационного и программного обеспечения АСУТП, АСУП, АСТПП и др., включая базы данных и методы их оптимизации, промышленный интернет вещей, облачные сервисы, удаленную диагностику и мониторинг технологического оборудования, информационное сопровождение жизненного цикла изделия), № 12 (методы создания специального математического и программного обеспечения, пакетов прикладных программ и типовых модулей функциональных и обеспечивающих подсистем АСУТП, АСУП, АСТПП и др., включая управление исполнительными механизмами в реальном времени).

Цель работы — повышение эффективности производства вафельных изделий на основе цифрового двойника за счёт разработки методов и алгоритмов автоматизированного контроля технологических процессов.

Задачи исследования. Достижение поставленной цели связано с решением следующих научных задач.

1. Анализ существующих систем контроля технологических процессов и их классификация по объектам, компонентам и в соответствии с концепцией умного производства.

2. Разработка комплекса моделей, методов и алгоритмов автоматизированного контроля параметров и ресурсного обеспечения технологического процесса производства вафель в условиях многорецептурного пищевого производства.

3. Разработка комплекса структурно-параметрических и математических моделей основных стадий производства вафель и цифровой информационной модели системы автоматизированного контроля технологического процесса производства вафель на основе предложенной

структуры цифрового двойника.

4. Разработка физической модели базы данных параметров технологического процесса производства вафель и его ресурсного обеспечения, программных модулей системы контроля технологических процессов производства вафель и подсистемы поддержки принятия решений на базе SCADA-системы.

Объект исследования — технологический процесс изготовления вафель многорецептурного пищевого производства.

Предмет исследования — методы контроля параметров и ресурсного обеспечения процесса производства вафель.

Методы и средства исследований. Диссертационное исследование выполнялось на основе положений и принципов системного и регрессионного анализа, теории и практики автоматизации технологических процессов, имитационного, структурно-функционального, объектно-ориентированного и структурно-параметрического методов моделирования процессов и систем, теории множеств и концепции умного производства.

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

— На основе классификационного анализа научных работ выделены объекты, компоненты и принципы построения новых производственных систем контроля и мониторинга технологических процессов, определяющие тенденции развития методов контроля технологических процессов пищевого производства, которые направлены на повышение эффективности сбора, обработки и анализа данных на уровне АСУТП.

— Разработан новый подход к проектированию информационного обеспечения систем автоматизированного контроля на производстве вафель, основанный на разработанных в данной работе двух видах цифровых двойников (α -ЦД и β -ЦД) и комплексе предложенных моделей, методов и алгоритмов их формирования и применения, для фиксации параметров и контроля ресурсного обеспечения технологических процессов.

— Разработан комплекс структурно-функциональных и объектно-ориентированных моделей, обеспечивающих создание и внедрение в реальных производственных условиях информационной системы автоматизированного контроля технологических процессов производства вафель, хранящей информацию об этих процессах с использованием предложенных в настоящей работе цифровых двойников и баз данных, на основе которых осуществляется систематизация и оперативный анализ параметров этих процессов в режиме реального времени.

Теоретическая и практическая значимость работы. Теоретическая значимость исследования заключается в том, что предложен новый метод автоматизированного контроля параметров технологического процесса и его ресурсного обеспечения на основе разработанного в данной работе цифрового двойника процесса для решения задач анализа технологических процессов пищевого производства вафель и управления ими, который является перспективным подходом к проектированию информационного обеспечения

систем управления технологическими процессами и позволяет произвести модификацию задач сбора и систематизации данных в АСУТП. При соответствующей адаптации предлагаемого метода автоматизированного контроля он может быть применён в условиях других технологических процессов со схожими характеристиками.

Классификационный подход к анализу и оценке современных информационных систем автоматизированного контроля технологических процессов позволяет определить их соответствие концепции построения систем умного производства и специализацию, что способствует созданию более эффективных стратегий модернизации действующих производств в соответствии с современными тенденциями развития отрасли.

Результаты выполнения поставленных научных задач данного исследования обладают практической значимостью.

— Разработанный метод автоматизированного контроля параметров технологического процесса и его ресурсного обеспечения в режиме реального времени на основе предложенного цифрового двойника процесса обеспечивает сбор и систематизацию несвязанных между собой данных параметров технологических процессов многорецептурного производства по изготовлению кондитерских изделий в режиме реального времени и повышение эффективности деятельности предприятия за счёт снижения издержек при производстве вафель, что подтверждается актом внедрения на ОАО «Рот Фронт».

— Предложенные в данной работе структура цифрового двойника технологического процесса и его ресурсного обеспечения, а также физическая модель базы данных цифровых двойников позволяет в систематизированной форме хранить данные и обеспечивать другие производственные системы необходимой информацией, позволяя решать различные аналитические и управленческие задачи и обеспечивать цифровую трансформацию предприятия. Данная практическая значимость основывается на акте внедрения в продукты и решения ООО «Векас».

— Применение предложенных структурно-параметрических и математических моделей обеспечивает работу подсистемы поддержки принятия решений для последующего формирования рекомендаций оператору и осуществления управляющих воздействий на технологические процессы производства вафель, что способствует повышению эффективности деятельности предприятия.

— Разработанный комплекс структурно-функциональных и объектно-ориентированных моделей обеспечивает возможность разрабатывать системы автоматизированного контроля технологических процессов многорецептурного пищевого производства для повышения эффективности деятельности предприятий, реализации стратегий модернизации, проектирования технологических процессов и повышения скорости решения комбинированных задач анализа. Данная практическая значимость формируется на основе разработки новых систем контроля на основе SCADA и актов внедрения в продукты и решения ООО «Векас» и ООО «ЭлитМатик».

Результаты диссертационной работы в виде комплекса моделей, методов и алгоритмов автоматизированного контроля технологических процессов производства вафель прошли апробацию и переданы для внедрения на ОАО «Рот Фронт» холдинга «Объединённые кондитеры». Предложенный в работе метод разработки обеспечивающих подсистем на базе SCADA на основе цифровых двойников процессов передана для внедрения в продукты и решения ООО «Векас» и ООО «ЭлитМатик». Научные и практические результаты настоящего исследования внедрены в учебные дисциплины кафедры промышленной информатики ФГБОУ ВО «МИРЭА — Российский технологический университет».

Положения, выносимые на защиту. На защиту выносятся следующие основные положения работы, определяющие решение поставленных задач.

1. Метод автоматизированного контроля параметров технологического процесса производства вафель и его ресурсного обеспечения на основе цифрового двойника на всех этапах жизненного цикла партии изделий.

2. Методы определения цифровых двойников и представления параметра технологического процесса производства вафель и его ресурсного обеспечения в цифровом двойнике.

3. Математическая модель связи параметров, технологических процессов производства вафель и цифровых двойников двух типов на основе теории множеств.

4. Алгоритмы фиксации параметров и ресурсного определения цифровых двойников в составе структурно-функциональной и объектно-ориентированной модели системы автоматизированного контроля технологических процессов производства вафель.

Личный вклад автора. Результаты данного диссертационного исследования заключаются в выполнении лично автором полного объёма исследований в рамках поставленных цели и задач этой работы.

Содержание диссертации и основные положения, выносимые на защиту, являются персональным вкладом автора в опубликованные работы. Значительная часть опубликованных работ выполнена самостоятельно. В статье [5] заложены основы для разработки нового метода автоматизированного контроля технологических процессов, а в работах [4, 6 и 7] лично автором предложено описание этого метода, а также необходимые другие методы и алгоритмы. Соавторство в статье [2] позволило автору проработать задачу организации сетевого взаимодействия на производстве для контроля технологических процессов.

Степень достоверности и апробация результатов, полученных в работе, обеспечивается проведением анализа рассматриваемого технологического процесса производства вафель, экспертными заключениями в отношении основных вопросов данной работы, соответствием работы программе стратегического развития производства РФ, а также применением классических и перспективных методов при разработке нового метода автоматизированного контроля для рассматриваемых процессов производства вафель.

Основные положения диссертационного исследования представлены на следующих конференциях: III Международная научно-практическая конференция «Инновации в науке и технике: современные вызовы». Москва. 30 июня 2024 г.; Международная научно-практическая конференция «Глобальные научные тенденции: интеграция и инновации». Саратов. 20 июля 2024 г.; V Международная конференция «Фабрика будущего: переход к передовым цифровым, интеллектуальным производственным технологиям и роботизированным системам для отраслей пищевой промышленности». Москва. 26 апреля 2024 г.; XI Международная научно-практическая конференция «Актуальные научные исследования». Пенза. 5 апреля 2023; VII Международная научно-практическая конференция «Современные аспекты научных исследований». Москва, 4 мая 2022; International conference on Industrial Engineering, ICIE 2021. Sochi, 17-21 мая 2021 г; II International scientific conference on applied physics, information technologies and engineering, APITECH. Krasnoyarsk, Russian Federation, 25 сентября–4 октября 2020 г; 2019 International Russian automation conference, Rusautocon 2019. Sochi, 08-14 сентября 2019 г; Четвертая научно-техническая конференция студентов и аспирантов МИРЭА-Российского технологического университета. Москва, 20-25 мая 2019 г.

Часть работ по теме диссертационного исследования проведена при финансировании РФФИ в рамках проекта 19-37-90053 «Нейросетевое предсказательное моделирование для прогнозирования в реальном масштабе времени протекания дискретных технологических процессов» в 2019-2022 гг.

Другая часть работ проведена в рамках проекта прикладных научных исследований и экспериментальных разработок (ПНИЭР) по заказу Министерства образования и науки РФ (уникальный идентификатор ПНИЭР RFMEFI58016X0008) по теме «Разработка информационно-программных средств для автоматизации управления высокотехнологичным оборудованием в условиях цифрового машиностроительного производства».

Состав публикаций. По теме диссертации опубликовано 11 научных работ, из них 5 в изданиях, входящих в перечень ВАК РФ для кандидатских диссертаций. Количество публикаций, проиндексированных в базе Scopus, равно 2.

Структура и объем диссертации. Структура диссертации состоит из введения, трёх глав основного текста, заключения, словаря терминов и списка используемых источников. Общий объем работы составляет 188 стр. и включает 56 рисунков, 18 таблиц, 7 приложений, содержащих акты внедрения и таблицу статистических данных, список литературы из 230 наименований.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Введение. Во введении работы определена актуальность настоящего диссертационного исследования. Сформулированы цель, задачи, научная новизна, практическая и теоретическая значимость и основные положения, выносимые на защиту.

Глава 1. В данной главе представлен обзор современных методов контроля технологических процессов и показано современное состояние

организации и управления производством вафель. Определены основные тренды развития данной области, среди которых можно выделить применение перспективных информационных технологий, таких как цифровые двойники, промышленный Интернет вещей, большие данные, искусственный интеллект, киберфизические системы, виртуальная и дополненная реальность и сервисная архитектура.

Анализ технологического процесса производства вафель позволил выделить его контролируемые параметры, необходимые для дальнейшей разработки функциональной схемы автоматизации в соответствии с компоновкой оборудования в цехе производства вафель ОАО «РОТ ФРОНТ». Показано, что данный технологический процесс характеризуется многорецептурностью, так как в рамках одного набора автоматизированного оборудования реализуется несколько рецептов (больше 5) за короткое время с разными составами и на основе разных поставок сырья с разными характеристиками.

Переходя к проблеме эффективного контроля технологических процессов производства вафель и для дальнейшего хода исследования, сделано уточнение, что основной акцент в работе поставлен на разработке нового подхода в области цифрового технологического мониторинга в части контроля, так как любой сбор данных предполагает наличие цели, заключающейся в использовании собранных данных для формирования управляющего воздействия. Исходя из этого, дано уточняющее определение мониторинга технологического процесса как процесса мониторинга в части контроля технологического процесса и его ресурсного обеспечения для последующего анализа и реализации эффективных стратегий управления технологическими процессами.

Анализ публикаций в области контроля и мониторинга технологических процессов с использованием трёх классификационных подходов: компонентный, объектный и концептуальный (П1-П6 — принципы построения умного производства) — позволил получить статистические данные (рис. 1) долей публикаций по промежуткам в 3 года. Проведённый анализ публикаций показал положительную динамику роста научного интереса в области цифрового технологического контроля более 10 % в каждом следующем периоде.

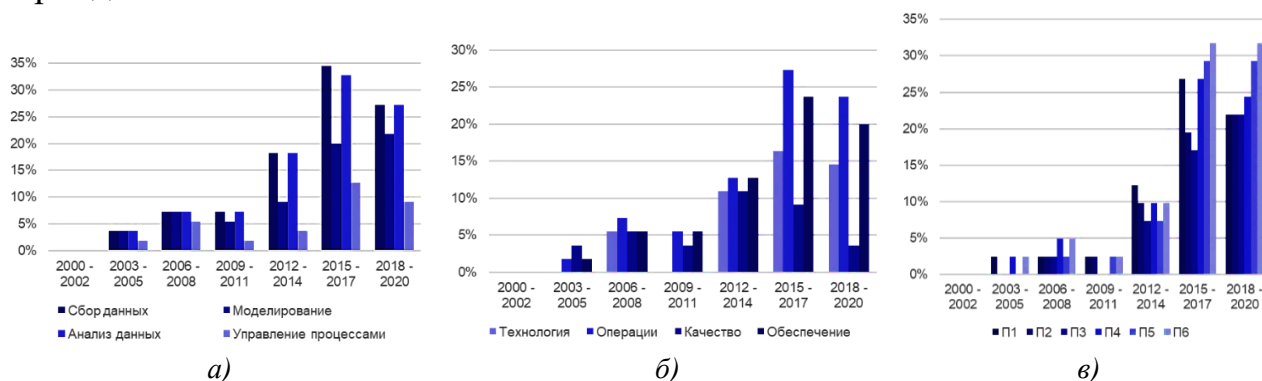


Рисунок 1 — Статистические результаты классификационных подходов: объектный (а), компонентный (б) и концептуальный (в).

Анализ аналогичных систем мониторинга и контроля, таких как, АИС «Диспетчер», WinCC OA, системы мониторинга на АО «Станкопресс», ХААСП и СМБПП показал, что используемые в этих системах методы контроля недостаточно эффективны, так как они не охватывают все стадии жизненного цикла изделий, либо ограничены в источниках собираемых данных, а в условиях многорецептурного (количество рецептов от 5 наименований) пищевого производства вафель, где общая доля издержек может достигать 12 %, эти недостатки систем являются значимыми.

На основе недостатков существующих систем контроля и проблем при изготовлении вафель для первого этапа модернизации производств выполнена постановка задачи диссертационного исследования, заключающаяся в разработке моделей, методов и алгоритмов автоматизированного контроля технологических процессов производства вафель на основе цифровых двойников процессов для повышения эффективности производства.

Глава 2. В начале второй главы сформулированы требования нового подхода к автоматизированному контролю технологических процессов производства вафель, среди которых выделены такие, как гибкость, масштабируемость, возможность оперативного анализа и систематизация собираемых данных. На основе этих требований и дополнительно проведённой оценки применимости технологии цифровых двойников разработана структура диссертационного исследования, включающая комплекс связанных моделей, методов и алгоритмов (рис. 2).

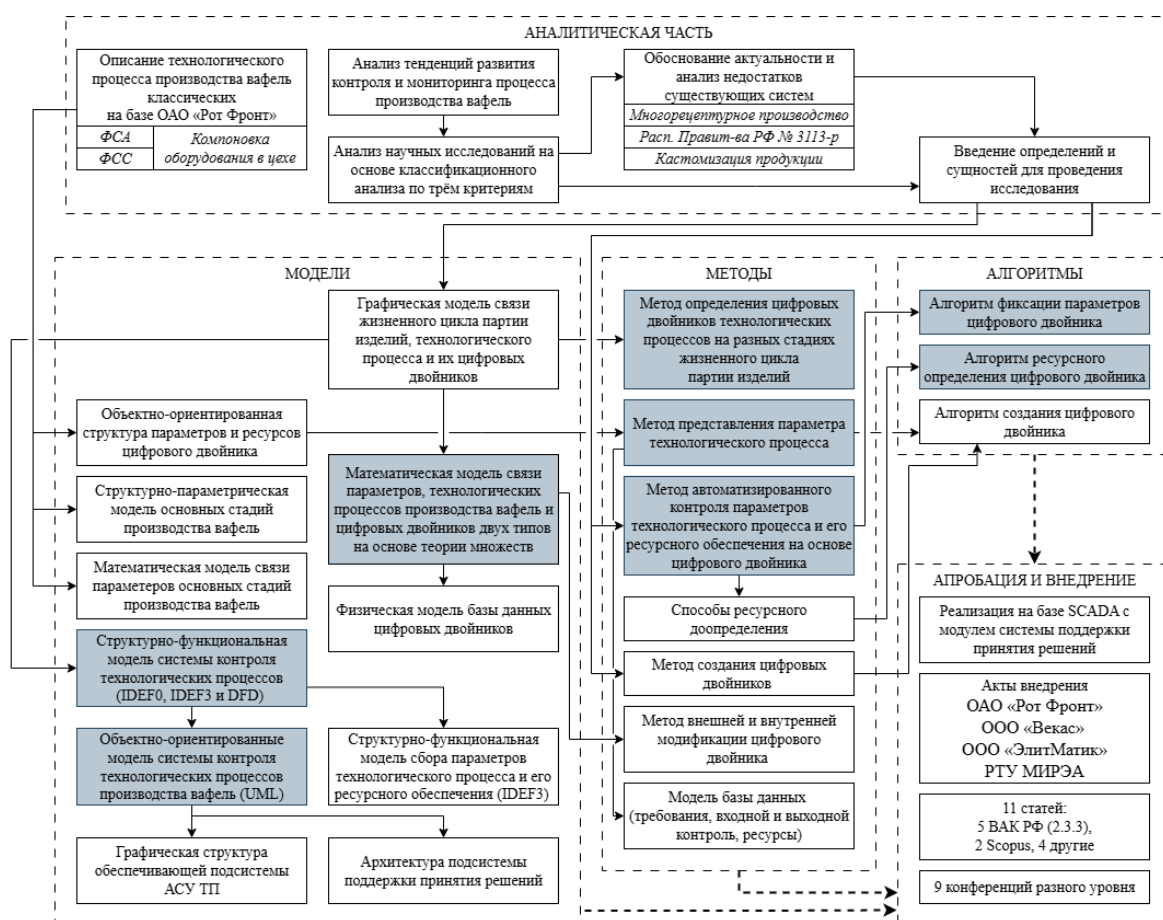


Рисунок 2 — Структура диссертационного исследования.

Главным методом диссертационного исследования является метод автоматизированного контроля технологических процессов производства вафель (рис. 3), который расширяет и конкретизирует основную обладающую научной новизной идею диссертационного исследования, которая заключается в применении двух типов связанных цифровых двойников к автоматизированному контролю рассматриваемых технологических процессов.

Для построения нового метода автоматизированного контроля технологических процессов введены новые сущности в соответствии с условиями их применения, которые рассматривались в первой главе. Первый тип двойников строится на основе требований к технологическому процессу (α -ЦД), а другой — на основе реальных данных, получаемых при реализации технологических процессов и связан с партией (β -ЦД).

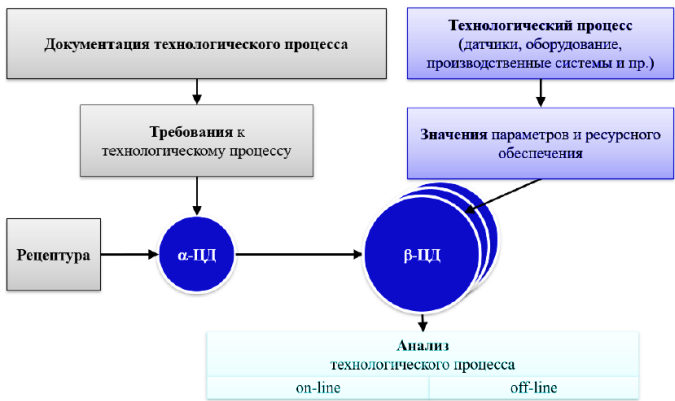


Рисунок 3 — Схема метода автоматизированного контроля технологических процессов.

В соответствии со структурой диссертационного исследования предложен метод создания цифровых двойников технологических процессов производства вафель с указанием стадий применения таких двойников, источников данных и генерируемой отчётности. На основе четырёхуровневой объектно-ориентированной структуры параметров и ресурсов и концептуальной структуры цифрового двойника технологического процесса (рис. 4, а и б) становится возможным формировать предлагаемый новый вид цифровых двойников (α -ЦД и β -ЦД), отличающихся от цифрового двойника изделия, определённого в ГОСТ Р 57700.37-2021.



Рисунок 4 — Объектно-ориентированная структура параметров и ресурсов цифрового двойника технологического процесса (а) и концептуальная структура α -ЦД и β -ЦД (б).

Структуры и предложенный метод создания предполагают автоматизированное преобразование документации в цифровой двойник технологического процесса, при котором α -ЦД дополняется полями, необходимыми для фиксации параметров и ресурсного обеспечения технологического процесса производства вафель. Структуры параметров и цифровых двойников образуют цифровую информационную модель технологического процесса производства вафель в виде его цифрового двойника.

Предложенная в работе модель связи жизненного цикла партии изделий из вафель, технологического процесса и цифровых двойников регламентирует эти связи в соответствии с концепцией построения систем умного производства и позволила разработать метод определения цифровых двойников (табл. 1) по степени их сформированности на каждой стадии производства, накладывающая дополнительные требования о заполнении полей двойников, где НО — это неопределённые, О — определённые и ПО — полностью определённые.

Таблица 1 — Метод определения цифровых двойников технологических процессов.

Стадии жизненного цикла цифрового двойника технологического процесса		Разработка рецептуры	Проектирование	Производство			Завершение заказа	Потребление и анализ
Этапы контроля технол. проц.		—		I	II	III	IV	—
Цифровые двойники	α -ЦД	НО		О			ПО	
	β -ЦД	НО			О		ПО	

В работе предложен метод внешней и внутренней модификации цифровых двойников, определяющий пути внесения изменений в цифровые двойники на основе соответствующих воздействий, уточняющий связи между двойником, партией вафель и технологическим процессом их производства, что далее послужит основой для разработки математической модели системы контроля. В качестве внешней модификации двойника понимался процесс внесения в него вынужденных изменений и создания новой его версии вследствие внешних причин (изменения состава изделий, производственных условий и т.д.), а под внутренней — процесс совершенствования двойника технологами без создания новой версии вследствие внутренних причин (системные ошибки, мероприятиями повышения эффективности производства и т.п.).

Разработанная в работе математическая модель связи параметров, технологических процессов производства вафель, цифровых двойников двух типов на основе теории множеств (табл. 2) сформировала количественные ограничения на связи элементов отображения для последующего создания модели базы данных цифровых двойников.

В рамках предлагаемой математической модели показано, что отображения f_1 и f_2 не являются инъекцией и сюръекцией:

$$\begin{aligned}
 (\forall \alpha, \alpha' \in A): (\alpha \neq \alpha') &\nRightarrow (f_1(\alpha) \neq f_1(\alpha')), \\
 (\forall \beta, \beta' \in B): (\beta \neq \beta') &\nRightarrow (f_2(\beta) \neq f_2(\beta')),
 \end{aligned}$$

$$(\forall \gamma \in \Gamma)(\nexists \alpha \in A): \gamma \neq f_1(\alpha), (\forall \alpha \in A)(\nexists \beta \in B): \alpha \neq f_2(\beta).$$

Таблица 2 — Отображения математической модели системы контроля технологических процессов.

Отображение	Множества	Пояснения
$f_1: A \rightarrow \Gamma, f_1(\alpha) = \gamma$	A — множество α -ЦД B — множество β -ЦД Γ — множество технологических процессов Δ — множество параметров процесса	$\Gamma = (\gamma^{(1)}, \gamma^{(2)} \dots \gamma^{(l)}),$ $A = \{\alpha^{1(l)}; \alpha^{2(l)}; \dots; \alpha^{k(l)}\},$ $k \in N$ – номер α -ЦД, $l \in N$ – номер процесса.
$f_2: B \rightarrow A, f_2(\beta) = \alpha$		$B = \{\beta_1^{1(l)}; \beta_2^{1(l)}; \dots; \beta_n^{1(l)}; \beta_1^{2(l)}; \dots; \beta_n^{2(l)}; \dots; \beta_n^{k(l)}\}$ $n \in N$ – номер β -ЦД (номер партии изделий).
$f_3: \Delta \rightarrow A, f_3(\delta) = \alpha$		$\Delta(\delta_1, \delta_2 \dots \delta_m), m \in N$ – номер параметра цифрового двойника технологического процесса.
$f_4: \Delta \rightarrow B, f_4(\delta) = \beta$		
$f_5: \Delta \rightarrow \Gamma, f_5(\delta) = \gamma$		

С другой стороны, определено, что отображения f_3 , f_4 и f_5 сюръективны, так как каждому набору параметров соответствует свой технологический процесс и α -ЦД, а при наличии изготовленной продукции — β -ЦД:

$$\forall \beta \in B \exists \delta \in \Delta, f_3(\delta) = \beta, \forall \alpha \in A \exists \delta \in \Delta, f_4(\delta) = \alpha, \\ \forall \gamma \in \Gamma \exists \delta \in \Delta, f_5(\delta) = \gamma.$$

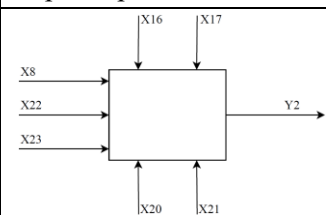
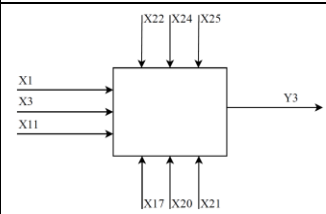
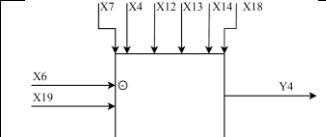
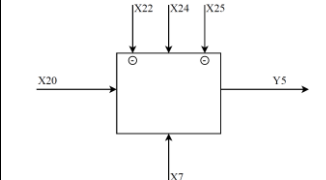
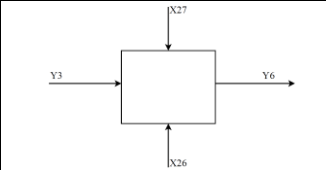
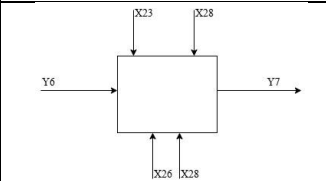
Данная математическая модель является основой для разработки информационной модели системы автоматизированного контроля технологических процессов и её модели данных с возможностью оценки необходимого объёма хранилищ для цифровых двойников.

В рамках решения третьей задачи диссертационного исследования на основе параметров технологического процесса производства вафель, рассмотренных в первой главе, и экспериментальных исследований на базе ОАО «Рот Фронт» выполнено структурно-параметрическое и математическое моделирование, иллюстрирующее возможное использование результатов применения предложенного комплекса методов автоматизированного контроля.

В ходе обработки экспериментальных данных получены: матрицы коэффициентов корреляции, регрессионная матрица связей и матрица безразмерных характеристик связей, которые позволили сформировать математические модели связей параметров основных стадий производства вафель для последующей реализации подсистемы поддержки принятия решений. Для параметрических моделей определены входные, регулируемые и контролируемые параметры (табл. 3). Параметры, оказывающие слабое влияние на выход (с корреляцией меньше 0,5), исключены из математических моделей. Оценка относительной погрешности составила 1,2587, а коэффициент множественной корреляции — 0,8312.

Таблица 3 — Сводная таблица построения структурно-параметрических и математических моделей стадий технологического процесса производства вафель.

№ п/п	Структурно-параметрическая модель	Математическая модель	Обозначения
1.		$Y_1 = 0,68X_1 + 0,75X_6 + 0,24X_8$	Y_1 — доля брака при отделении вафель от пластин, X_1 — вес желтка (меланжа), X_6 — вес растительного масла, X_8 — вес гидрокарбоната натрия.

№ п/п	Структурно- параметрическая модель	Математическая модель	Обозначения
2.		$Y_2 = 0,54X_8 + 0,75X_{22} + 0,89X_{23}$	Y_2 — цвет вафель, X_{22} — температура в печи, X_{23} — время выпечки листа.
3.		$Y_3 = 0,84X_3 + 0,95X_{11}$	Y_3 — влажность вафель после выпечки, X_3 — доля воды при замесе меланжа, X_{11} — доля воды на этапе замеса теста.
4.		$Y_4 = -0,63X_6 + 0,79X_{19}$	Y_4 — консистенция вафель (доля включений), X_{19} — окружная скорость турбины.
5.		$Y_5 = 0,88X_{20} - 0,54X_{22} + 0,65X_{24} - 0,43X_{25}$	Y_5 — масса вафельного листа, X_{20} — вес дозы теста, X_{24} — зазор пластин печи, X_{25} — скорость запора пластин печи.
6.		$Y_6 = 0,91Y_3 + 0,69X_{27}$	Y_6 — влажность вафель на этапе кондиционирования на стадии термообработки.
7.		$Y_7 = 0,84Y_6 + 0,44X_{28}$	Y_7 — хрусткость при разламывании после термообработки, X_{28} — время охлаждения.

Глава 3. Эта глава посвящена практической реализации предложенного комплекса моделей и методов с разработкой алгоритмов в условиях многорецептурного пищевого производства вафель.

Рассмотрены условия работы системы, из которых учитываются широкий набор рецептов (более 5) и степень цифровизации процессов на производстве вафель. Определены возможности использования предлагаемого метода контроля на всех этапах жизненных циклов цифровых двойников (рис. 5).

На основе условий и требований разработана модель системы автоматизированного контроля технологических процессов в нотациях IDEF0 и IDEF3, которая является основой и первым этапом при проектировании информационной системы контроля, необходимой для дальнейшей разработки программного обеспечения, осуществляющего сбор и обработку данных на уровне АСУ ТП.

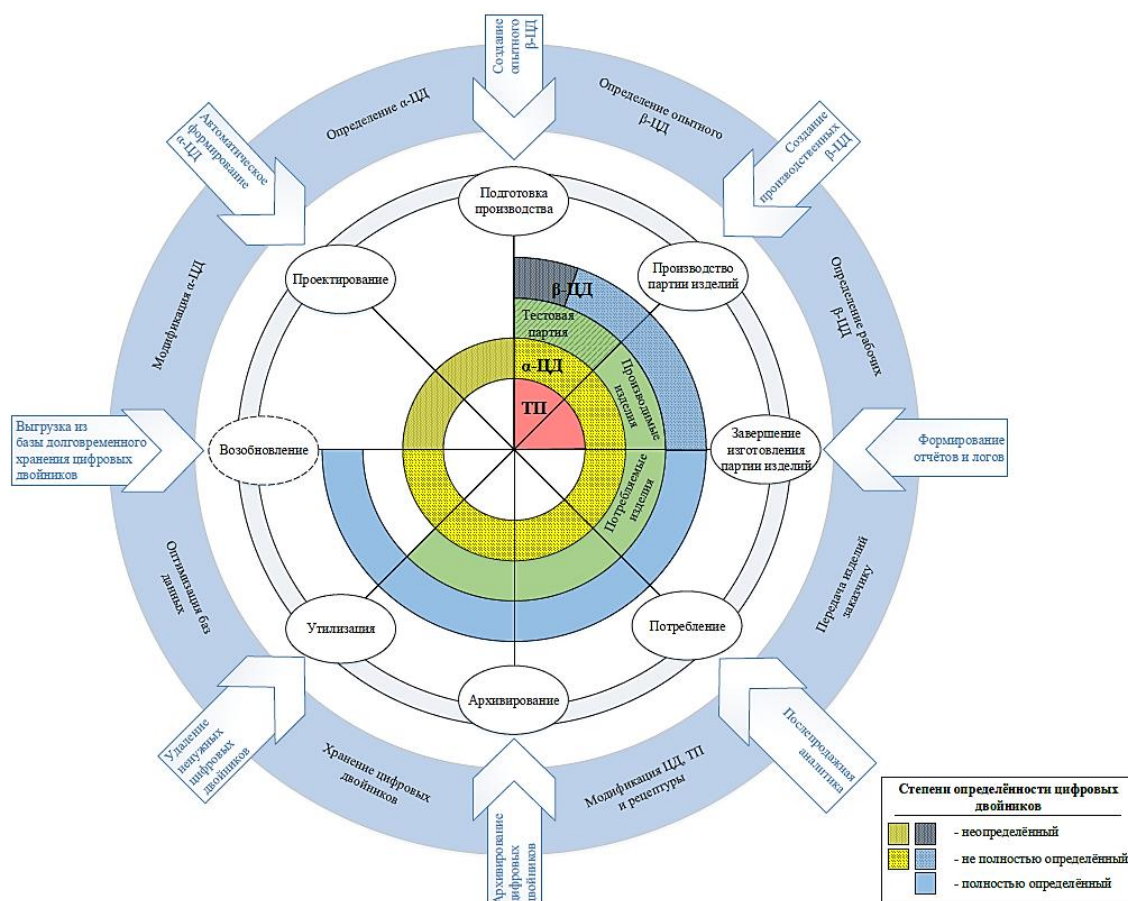


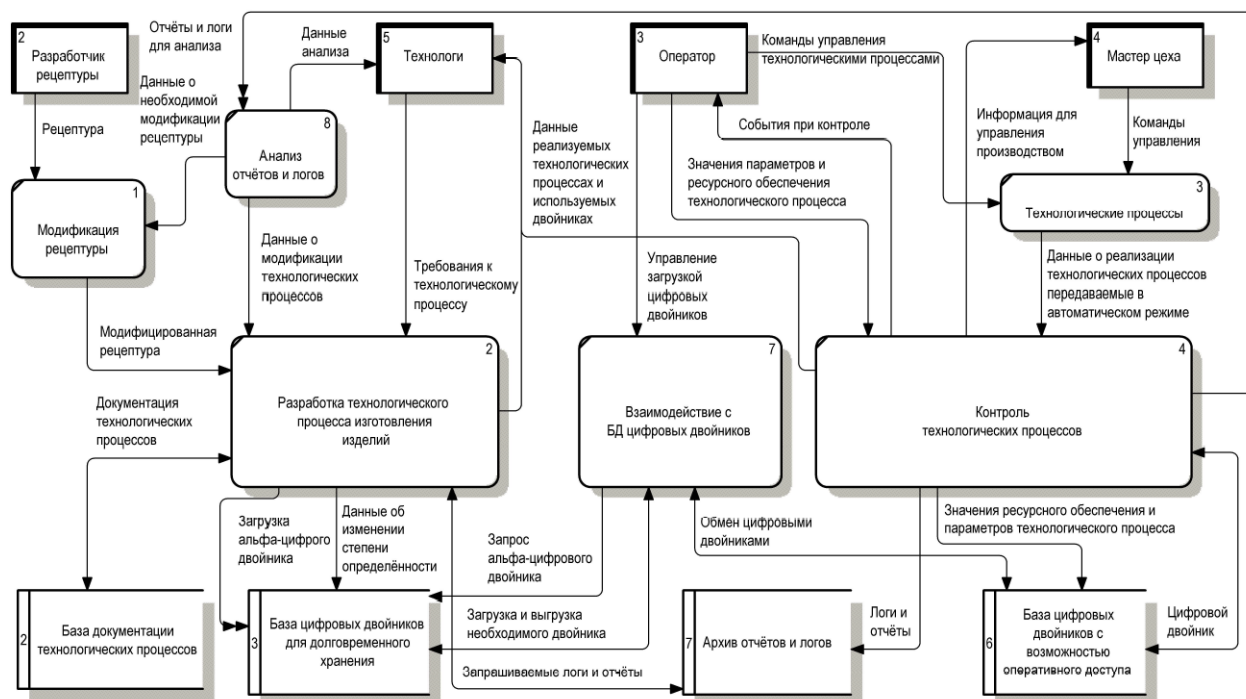
Рисунок 5 — Графическая модель связи жизненного цикла с применением системы автоматизированного контроля технологических процессов цифровых двойников.

В ходе структурно-функционального моделирования получены диаграммы на двух уровнях декомпозиции (рис. 6), описывающие функции системы автоматизированного контроля технологических процессов производства вафель, включая загрузку и коррекцию α-ЦД, ресурсное определение технологического процесса, фиксирование его параметров и анализ данных.



Рисунок 6 — Диаграмма дерева узлов структурно-функциональной модели.

Для определения способов взаимодействия участников процесса производства и функции системы контроля технологических процессов с необходимостью использования двух типов хранилищ цифровых двойников для оперативного доступа и долговременного хранения предложена диаграмма потоков данных (рис. 7).



На втором этапе проектирования системы автоматизированного контроля технологических процессов проведено объектно-ориентированное моделирование системы автоматизированного контроля технологических процессов производства вафель, на основе которого уже разрабатывался программный код для системы автоматизированного контроля технологических процессов производства вафель.

Введя обозначения $|A|$ и $|B|$ как мощности множеств α -ЦД и β -ЦД, показав через V_{α_i} и V_{β_i} объёмы данных, необходимые для хранения значений полей (атрибутов) соответственно α -ЦД и β -ЦД, получено уравнение оценки объёма хранилища цифровых двойников:

$$\max V_x = 2 \sum_{i=1}^{|A|} \sum_{j=1}^{16} \max V_{\alpha_{ij}} + \sum_{i=1}^{|B|} \sum_{j=17}^{23} \max V_{\beta_{ij}}, V_x = 32\,912 \cdot |A| + 4\,164 \cdot |B|.$$

Предложенный в работе алгоритм создания цифрового двойника построен на основе методов его создания и представления, где реализованы возможности коррекции технологом двойника и автоматическая проверка корректности структуры при загрузке перед выполнением процесса контроля технологических процессов. Этот алгоритм создания построен на основе математической модели связи параметров и определяет механику создания новых экземпляров цифровых двойников.

Алгоритмы фиксации параметров и ресурсного определения (рис. 8) построены на основе сопоставления требований к ним и значений от датчиков и промышленного оборудования. В алгоритме ресурсного определения определён функционал запросов допоставки ресурсов с повторной проверкой соответствия требованиям, внесённым в цифровой двойник первого типа, а в алгоритме фиксации параметров — возможность ручного ввода при невозможности автоматизированного получения данных.

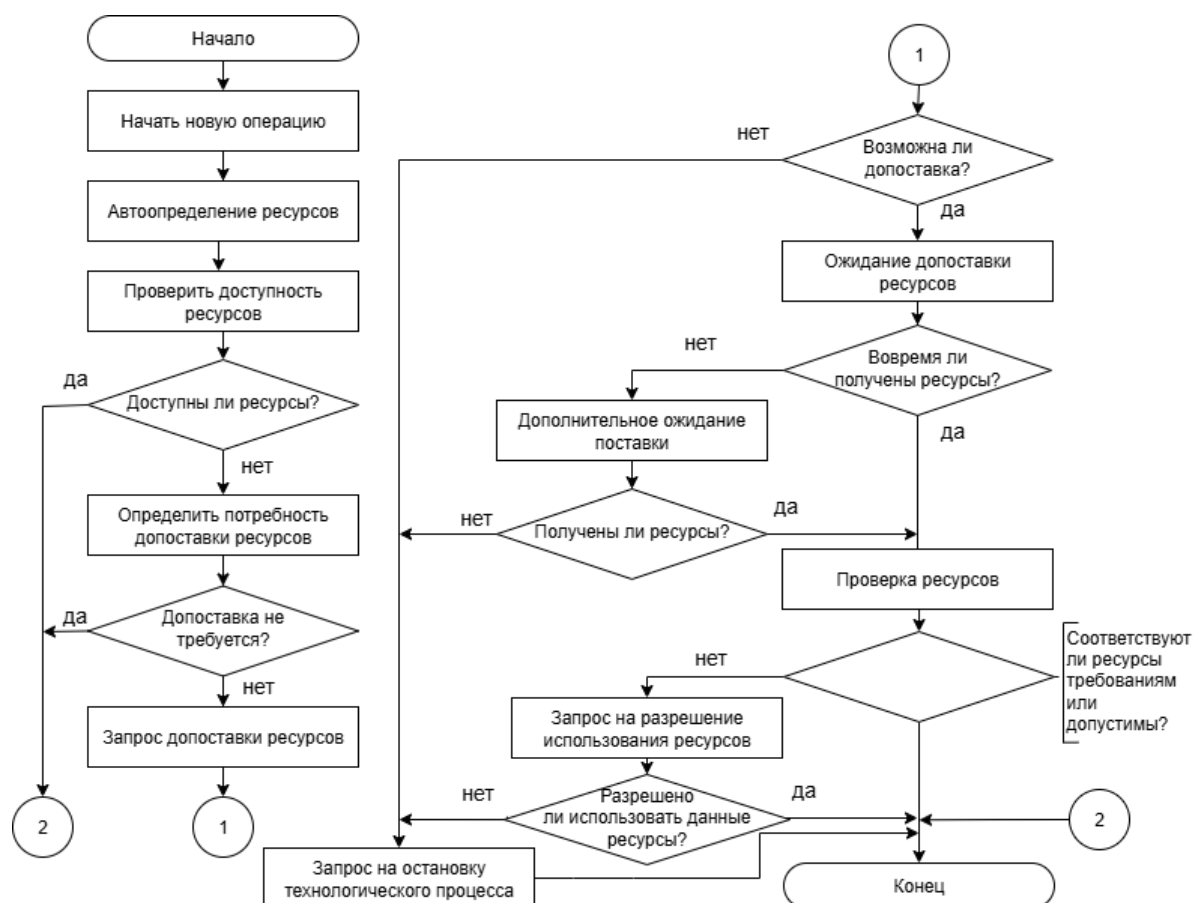


Рисунок 8 — Алгоритм ресурсного доопределения технологического процесса.

В последней части главы выполнена апробация разработанного метода контроля технологического процесса производства вафель и других предложенных в работе моделей, методов и алгоритмов на основе действующих производственных участков ОАО «Рот Фронт» холдинга ООО «Объединённые кондитеры». Главным результатом апробации стало снижение отходов при производстве вафель.

В качестве примера управляющего воздействия, которое может реализовываться на основе данных контроля технологических процессов производства вафель, спроектирована (рис. 9) и разработана подсистема поддержки принятия решений, использующая ранее полученные математические и структурно-параметрические модели.

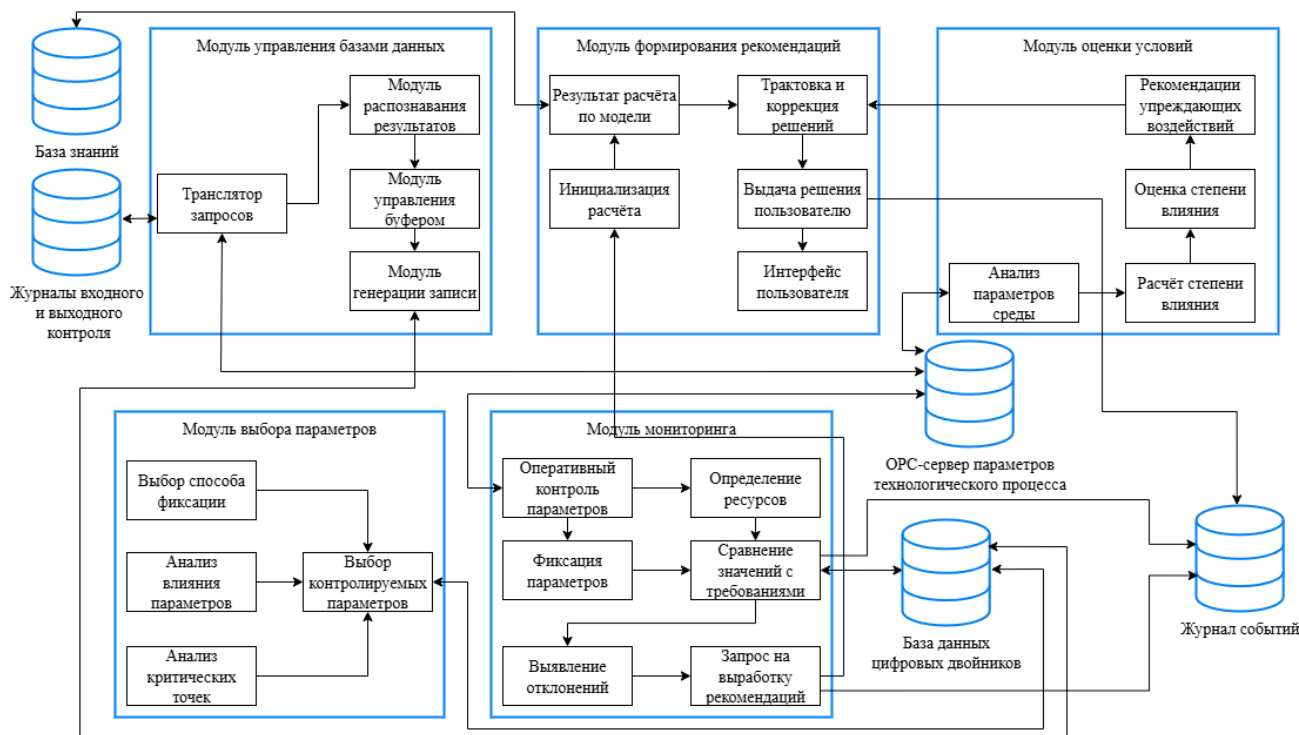


Рисунок 9 — Архитектура подсистемы поддержки принятия решений.

Для хранения параметров в структурированном виде разработана модель базы данных (рис. 10) системы автоматизированного контроля технологических процессов производства вафель, объединяющая оба типа цифровых двойников, рецептуры, требования к технологическому процессу и данные входного и выходного контроля на основе диаграммы IDEF3.

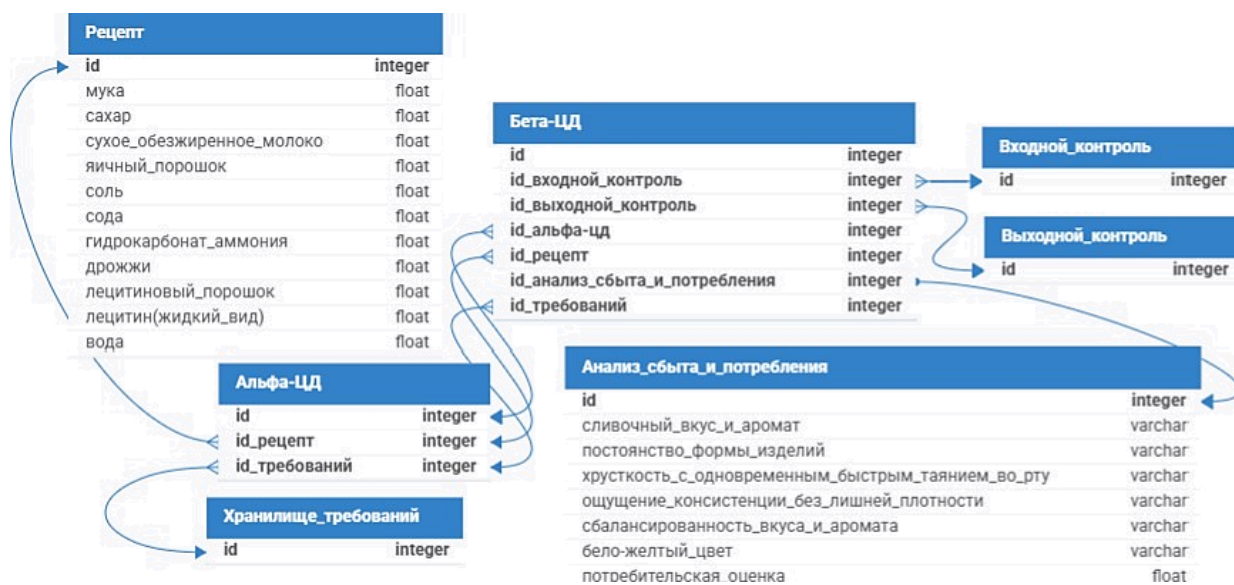


Рисунок 10 — Корневая модель базы данных цифровых двойников.

Практическая реализация предложенного в диссертационной работе комплекса моделей, методов и алгоритмов контроля технологических процессов производства вафель, подсистемы поддержки принятия решений и модели базы данных выполнена в составе SCADA-системы, которая является обеспечивающей подсистемой АСУТП (рис. 11).

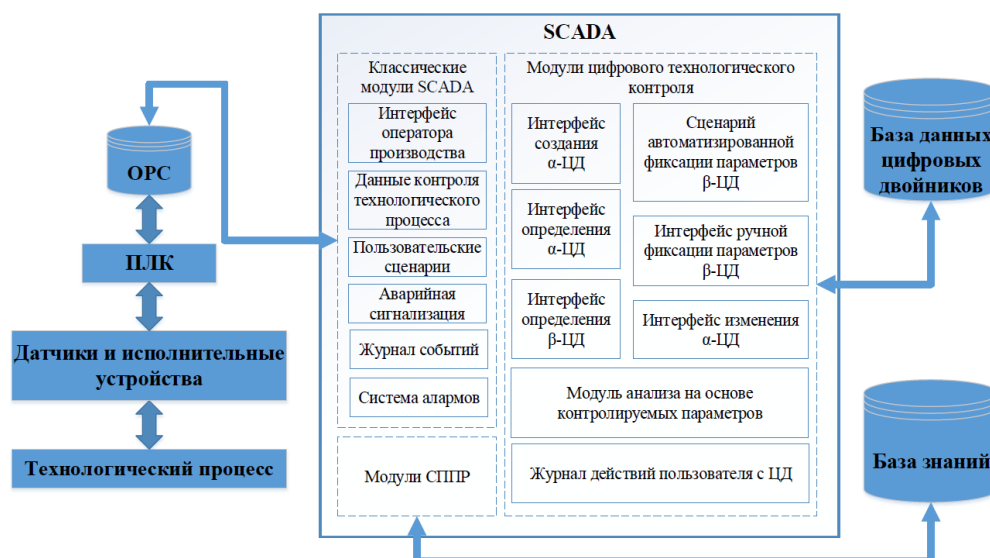


Рисунок 11 — Структура обеспечивающей системы АСУТП.

Загрузка и работа с цифровым двойником возможна напрямую через интерфейс SCADA-системы (рис. 12), откуда можно обращаться в базу данных цифровых двойников с возможностью оперативного доступа (рис. 13), а также получать информационные сообщения из подсистемы поддержки принятия решений. Данный функционал реализован в соответствии с результатами этапа проектирования информационной системы автоматизированного контроля технологических процессов производства вафель.

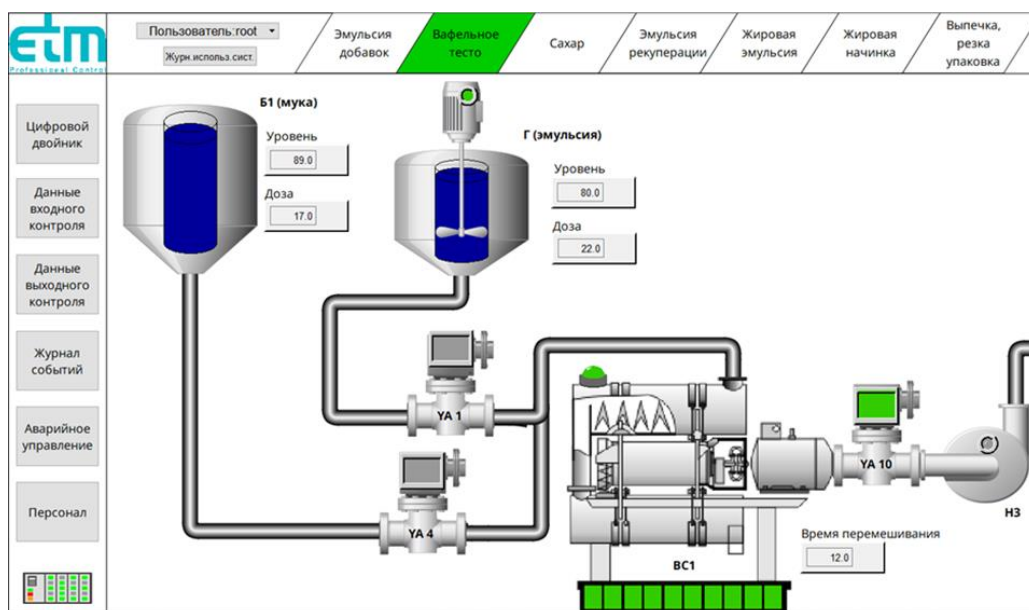


Рисунок 12 — Фрагмент интерфейса SCADA-системы с возможностью вызова цифрового двойника партии.

Дата создания	Номер партии	Время последнего изменения	Время полной определённости	Параметр	Фикс.	Контр.	Допуск	Тип допуска	Единица измерения	Время получения	Источник	Ссылка источника	Значение	Стадия	Временная отметка	Автор
03.12.2023	54	03.12.2023 10:25	03.12.23 8:22	Рецептура/Состав/Мука	TRUE	TRUE	0,1	1	кг	03.12.23 10:25	БД Рецептуры	"select * from	100,0	2 Замес вафле	03.12.2023 10:25	Оператор
03.12.2023	54	03.12.2023 10:25	03.12.23 8:22	Рецептура/Состав/Вода	TRUE	TRUE	0,05	1	кг	03.12.23 10:25	БД Рецептуры	"select * from	145,0	2 Замес вафле	03.12.2023 10:25	Оператор
03.12.2023	54	03.12.2023 10:25	03.12.23 8:22	Вафельное тесто/Дозы/Мука	TRUE	TRUE	0,1	1	кг	03.12.23 10:40	БД OPC INSAT	"select * from	100,0	2 Замес вафле	03.12.23 10:40	SCADA
03.12.2023	54	03.12.2023 10:25	03.12.23 8:22	Вафельное тесто/Дозы/Вода	TRUE	TRUE	0,05	1	кг	03.12.23 10:40	БД OPC INSAT	"select * from	145,1	2 Замес вафле	03.12.23 10:40	SCADA

Рисунок 13 — Фрагмент базы параметров технологического процесса в цифровом двойнике.

При разработке метода автоматизированного контроля технологических процессов производства вафель требования по его реализации в условиях многорецептурного производства удовлетворены через обеспечение работы системы в режиме мягкого реального времени, цифровизация процессов обеспечена через предложенные методы представления параметров в цифровых двойниках и их структуру, модульность и децентрализация — через применение разрозненных хранилищ и клиент-серверной архитектуры, сервисная ориентированность — через обеспечение данными различных производственных систем при использовании стандартных протоколов на разных стадиях жизненного цикла партии изделий, а также информационного сопровождения процессов переналадки и модификации производственной системы автоматизированного контроля, а совместимость — через возможность автоматизированной загрузки требований из документации и применение классических средств и систем АСУТП.

В заключении приведены основные результаты проведённого исследования, предложены рекомендации по их использованию и обозначены возможные направления будущих исследований по данной теме.

В приложениях работы вынесены акты внедрения на предприятиях, таблицы использованных статистических данных и фрагменты программного кода системы автоматизированного контроля технологических процессов производства вафель.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Решение поставленных научных задач в ходе настоящего диссертационного исследования позволило получить следующие результаты.

Анализ существующих систем контроля технологических процессов и их классификация по трём принципам, в том числе в соответствии с концепцией умного производства позволили выделить существующие проблемы по теме диссертационного исследования и актуальность разработки моделей, методов и алгоритмов цифрового технологического автоматизированного контроля.

Разработан комплекс моделей, методов и алгоритмов автоматизированного контроля параметров и ресурсного обеспечения технологического процесса производства вафель в условиях многорецептурного производства, основной идеей которого стало применение предложенных цифровых двойников двух типов, позволяющий модифицировать задачи сбора данных на уровне АСУТП. Предложенная структура цифрового двойника и физическая модель базы данных обеспечивает систематизацию и цифровую трансформацию производства вафель. Внедрение нового информационного обеспечения АСУТП прогнозируется за счёт проведения предложенной в работе оценки объёма хранилищ данных для разработанных цифровых двойников.

Результаты, связанные с цифровыми моделями технологических процессов и этапов проектирования информационного обеспечения, внедрены на ООО «Векас» и ООО «ЭлитМатик».

Предложены математические и структурно-параметрические модели для каждой стадии производства вафель, позволившие реализовать подсистему поддержки принятия решений и формировать рекомендации по улучшению и модификации технологических процессов, снижать количество брака, а также уменьшать влияние человеческого фактора на качество выпускаемой продукции.

Выполнена производственная проверка и апробация результатов с последующим внедрением на предприятии по производству вафель ОАО «Рот Фронт». В результате апробации метода и алгоритмов автоматизированного контроля технологических процессов производства вафель и реализации подсистемы поддержки принятия решений достигнуто снижение издержек при производстве вафель на данном предприятии.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

В изданиях, рекомендованных ВАК РФ

1. Антонов С. В. Концептуальная модель мониторинга производства вафель на основе технологии цифрового двойника // Современные наукоемкие технологии. 2025. № 1. С. 10-16. DOI 10.17513/snt.40273.
2. Кузнецов Н. А., Антонов С. В. Использование автоматного подхода для проектирования сетевой информационно-управляющей системы // Вестник компьютерных и информационных технологий. 2024. № 3. С. 37-43. DOI: 10.14489/vkit.2024.03.pp.037-043.
3. Антонов С.В. Функциональное моделирование системы мониторинга технологических процессов на основе концепции цифрового двойника // Автоматизация. Современные технологии. 2023. Т. 77, № 8. С. 345-351. DOI: 10.36652/0869-4931-2023-77-8-345-351.
4. Холопов В.А., Антонов С.В., Курнасов Е.В., Каширская Е.Н. Разработка и применение цифрового двойника машиностроительного технологического процесса // Вестник машиностроения. 2019. № 9. С. 37-431.
5. Холопов В.А., Гантц И.С., Антонов С.В. Применение информационных технологий при решении задач мониторинга выполнения производственных процессов в концепции индустрии 4.0 // Промышленные АСУ и контроллеры. 2019. № 4. С. 49-58. DOI: 10.25791/asu.04.2019.580.

В изданиях, входящих в базы данных Scopus и Web of Science

6. Kholopov V.A., Antonov S.V., Kurnasov E.V., Kashirskaya E.N. Digital Twins in Manufacturing // Russian Engineering Research. 2019. No. 39. PP. 1014-1020. DOI: 10.3103/S1068798X19120104.
7. Kholopov V.A., Antonov S.V., Kashirskaya E.N. Application of the digital twin concept to solve the monitoring task of machine-building technological process / 2019 International Russian Automation Conference (RusAutoCon). 2019. DOI: 10.1109/RUSAUTOCON.2019.8867800.

В других изданиях

8. Антонов С.В. О проблеме брака в условиях мелкосерийного многономенклатурного производства // «Актуальные научные исследования»: сборник статей XI Международной научно-практической конференции, Пенза, 05 апреля 2023 года. 2023. С. 80-83.

9. Антонов С. В. Разработка структуры цифрового двойника для эффективного мониторинга технологических процессов // Научный альманах Центрального Черноземья. 2022. № 1-2. С. 17-23.

10. Антонов С.В. Мониторинг технологических процессов на основе цифрового двойника / Четвертая научно-техническая конференция МИРЭА — Российского технологического университета. Сборник трудов, 20-25 мая 2019 г. [Электронный ресурс]. М.: РТУ МИРЭА, 2019. — Электрон. опт. диск (ISO).

11. Антонов С.В. Инновационный потенциал автоматизации информационно-технических систем / Материалы Международного молодёжного научного форума «Ломоносов-2018». [Электронный ресурс]. М.: МАКС Пресс. 2018. — Электрон. опт. диск (ISO).