

**АНТОНОВ СЕРГЕЙ ВАЛЕРЬЕВИЧ**

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

Специальность 2.3.3 — Автоматизация и управление  
технологическими процессами и  
производствами (технические науки)

**АВТОРЕФЕРАТ**

**диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук**

Работа выполнена на кафедре промышленной информатики федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования (ФГБОУ ВО) «МИРЭА — Российский технологический университет».

**Научный руководитель:** **Холопов Владимир Анатольевич**  
кандидат технических наук, доцент ФГБОУ ВО «МИРЭА — Российский технологический университет», заведующий кафедрой промышленной информатики

**Официальные оппоненты:** **Хаустов Игорь Анатольевич,**  
доктор технических наук, профессор ФГБОУ ВО «Воронежский государственный университет инженерных технологий», профессор, заведующий кафедрой информационных и управляющих систем

**Копейкин Роман Евгеньевич,**  
кандидат технических наук, ФГБОУ ВО «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)», доцент кафедры «Автономные информационные и управляющие системы»

**Ведущая организация:** Акционерное общество «Научно-исследовательский институт вычислительных комплексов (НИИВК) имени М.А. Карцева»

Защита состоится «26» сентября 2024 г. в 10 час. 00 мин. на заседании Диссертационного Совета 24.2.334.01 (Д 212.148.02) при ФГБОУ ВО «Российский биотехнологический университет» по адресу: 109316, г. Москва, ул. Талалихина, д. 33, конференц-зал.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФБОУ 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, ФБОУ ВО «РОСБИОТЕХ».

Автореферат разослан «\_\_» \_\_\_\_\_ 2024 г.

Учёный секретарь Диссертационного совета  
24.2.334.01 (Д 212.148.02),  
кандидат технических наук

\_\_\_\_\_ Мокрушин С.А.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### **Актуальность работы.**

Современное развитие производства можно охарактеризовать следующими тенденциями.

Во-первых, это тенденция применения перспективных информационных технологий на всех стадиях жизненного цикла продукта, которая стимулирует оцифровку производственных процессов и обеспечивает цифровую трансформацию предприятий. Эта цифровая трансформация поддерживается в России на государственном уровне через реализацию соответствующих программ, таких как проект «Умное производство» в рамках стратегического направления в области цифровой трансформации обрабатывающих отраслей промышленности на основе распоряжения Правительства Российской Федерации от 6 ноября 2021 г. № 3142-р, национальная программа «Цифровая экономика» и других.

Во-вторых, в рамках другой тенденции со стороны производств всё чаще практикуется использование новых технологий для решения широкого спектра задач и повышения их конкурентоспособности, а также для обеспечения сбора данных с целью разработки новых технологических процессов и модернизации действующих.

В-третьих, сформировалась тенденция на производство кастомизированной продукции и, как следствие, одновременную реализацию нескольких технологических процессов в рамках одного производства, которая приводит к расширению номенклатуры 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. Сам технологический процесс производства вафель можно охарактеризовать тем, что на качество продукта влияет множество технологических параметров, собираемых несистематизировано 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, высокий уровень издержек при производстве и обозначенные выше факторы, характеризующие производство вафель, позволяют утверждать, что мониторинг и контроль технологических

процессов на таком производстве имеет низкую эффективность, эта проблема актуальна и нуждается в научной проработке.

Тему производственного мониторинга и контроля можно считать хорошо проработанной. Среди авторов научных работ, которые занимались этой темой можно отметить Битюкова В.К., 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., Жиров М.В., Гданский Н.И., Краснов А.Е., Красинский А.Я., Мартинов В.Г., Николаев Н.С., Прохоров А., Рот А., Шваб К., Шеве Г., Шеффер Э. и другие. Производство вафель было 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 АСУ ТП, АСУП, АСТПП и др., включая управление исполнительными механизмами в реальном времени).

**Цель работы** — разработка методов и алгоритмов построения системы контроля технологических процессов для обеспечения анализа и повышения эффективности производства вафельных изделий на основе цифрового двойника.

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

1. Анализ существующих систем контроля технологических процессов и их классификация в соответствии с концепцией умного (высокотехнологичного) производства.

2. Разработка концептуальной модели контроля многорецептурного производства кондитерской отрасли с целью создания цифрового двойника технологического процесса.

3. Разработка цифровой информационной модели технологического процесса пищевого производства с использованием цифрового двойника процесса.

4. Разработка методов и алгоритмов контроля параметров технологического процесса производства вафель и его ресурсного обеспечения в условиях многорецептурного пищевого производства.

5. Разработка структурно-параметрических и математических моделей основных стадий производства вафель для обеспечения работы подсистемы поддержки принятия решений.

6. Разработка методики контроля технологических процессов производства вафель в условиях многорецептурного пищевого производства.

7. Разработка модели информационной системы контроля технологических процессов производства вафель в условиях многорецептурного пищевого производства с подсистемой поддержки принятия решений.

**Объект исследования** — технологический процесс изготовления вафель многорецептурного пищевого производства.

**Предмет исследования** — контроль 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.

— Предложена новая концептуальная модель контроля технологических процессов многорецептурного пищевого производства кондитерских изделий на основе применения двух типов связанных цифровых двойников (ЦД), модифицирующая задачи сбора данных в АСУ ТП.

— Разработан новый подход к проектированию информационного обеспечения систем управления, включающий комплекс методов и алгоритмов формирования и применения  $\alpha$ -ЦД и  $\beta$ -ЦД для фиксации параметров и ресурсного обеспечения технологических процессов производства вафель.

— Разработана новая методика организации и применения систем контроля технологических процессов многорецептурного пищевого производства, обеспечивающая хранение информации с использованием баз данных, её систематизацию и оперативный анализ параметров процессов в режиме реального времени.

**Теоретическая и практическая значимость работы.** Теоретическая значимость исследования заключается в разработке концептуальной модели применения цифровых двойников для решения задач контроля технологических процессов пищевого производства, которая является перспективным подходом к проектированию информационного обеспечения систем управления технологическими процессами и позволяет произвести модификацию задач сбора и систематизации данных в АСУ ТП.

Результаты выполнения поставленных научных задач данного исследования обладают практической значимостью.

— Обеспечивается возможность сбора и систематизации несвязанных между собой данных параметров технологических процессов многорецептурного производства по изготовлению кондитерских изделий в режиме реального времени и повышения эффективности деятельности предприятия за счёт снижения влияния человеческого фактора на качество выпускаемой продукции;

— Обеспечивается возможность анализа данных параметров технологических процессов многорецептурного производства вафель в режиме

реального времени и сокращать время решения комбинированных задач анализа технологических процессов;

— Обеспечивается возможность разрабатывать системы контроля технологических процессов для многорецептурного пищевого производства и обеспечивать цифровую трансформацию технологических процессов для повышения эффективности деятельности предприятий, поиска узких мест и решения задач модернизации и проектирования технологических процессов,

— На основе комплекса методов и алгоритмов можно решать различные задачи анализа и управления технологическими процессами, как например, реализация поддержки принятия решений на базе предлагаемого комплекса методов и алгоритмов контроля.

Результаты диссертационной работы в виде комплекса методов и алгоритмов контроля технологических процессов производства вафель прошли апробацию и были переданы для внедрения на ОАО «Рот Фронт» холдинга «Объединённые кондитеры». Предложенная в работе методика разработки обеспечивающих подсистем на базе SCADA на основе цифровых двойников процессов была 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. Концептуальная модель контроля многорецептурного пищевого производства вафель на основе двух типов связанных цифровых двойников.

2. Методы и алгоритмы создания и использования цифровых двойников при контроле технологических процессов производства вафель при многорецептурном пищевом производстве.

3. Методика контроля многорецептурного пищевого производства вафель на основе предложенной концепции.

**Личный вклад автора.** Результаты данного диссертационного исследования заключаются в выполнении лично автором полного объёма исследований в рамках поставленных целей 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 работах [3, 5 и 6] лично автором предложена концептуальная модель контроля

технологических процессов, а также его методы и алгоритмы. Соавторство в статье [1] позволило автору проработать задачу организации сетевого взаимодействия на производстве для контроля технологических процессов.

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

Основные положения диссертационного исследования были представлены на следующих конференциях: 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 была поддержана и 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 была 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 10 научных работ, из них 4 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 объём работы включает 55 рисунков, 18 таблиц, 5 приложений, содержащих акты внедрения и таблицу статистических данных, список литературы из 230 наименований и составляет 171 стр.

## 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 «Обзор современных методов контроля технологических процессов».** В данной главе представлен обзор современных методов контроля технологических процессов в условиях производства вафель.

Показано современное состояние организации и управления технологическими процессами. 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.

Тщательно произведён анализ технологического процесса производства вафель. Рассмотрена и изучена компоновка оборудования в цехе производства вафель ОАО «РОТ ФРОНТ» и описаны этапы производства, что позволило разработать функциональную схему автоматизации. На основе полученных данных и дополнительного изучения литературы изучена функционально-структурная схема технологического процесса производства вафель (рис. 1), на основе чего сформированы сводные таблицы параметров контроля и регулирования с допусками на разных этапах жизненного цикла изделия. Сформулированы требования к качеству изготавливаемых изделий и описаны проблемы данного типа производств.

Переходя к проблеме эффективного мониторинга 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, было 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.

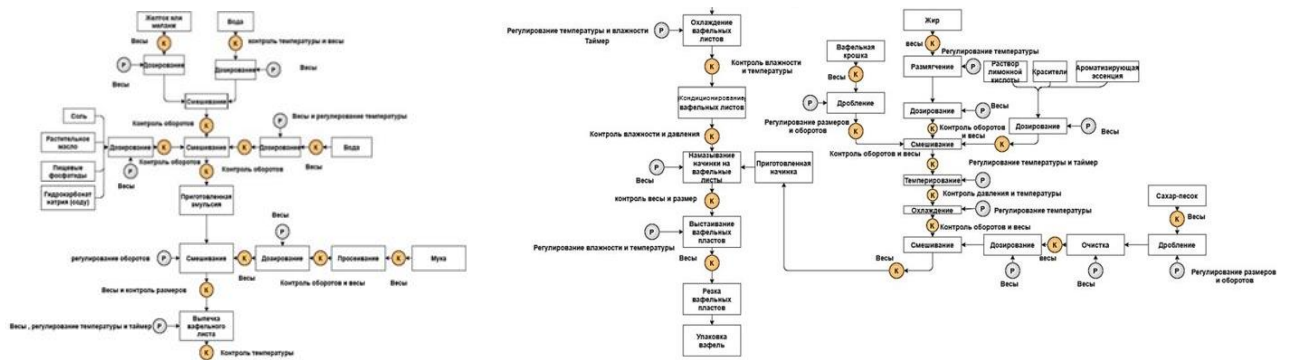


Рисунок 1 — Контролируемые и регулируемые параметры технологического процесса производства вафель.

Далее проведён более глубокий анализ публикаций в области мониторинга технологических процессов с использованием трёх классификационных подходов: компонентный, объектный и концептуальный (П1-П6 — принципы построения умного производства). Получены статистические данные (рис. 2) долей публикаций по промежуткам в 3 года. Сделан акцент на положительную практику применения цифровых двойников для решения различных производственных задач.

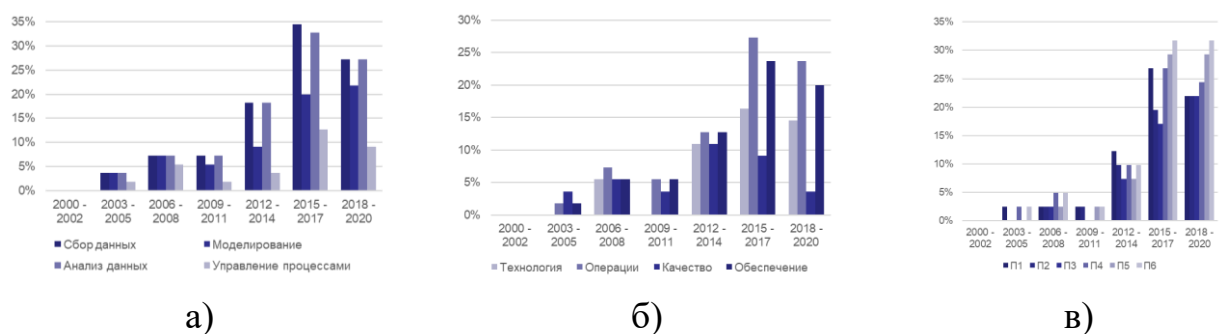


Рисунок 2 — Статистические результаты классификационных подходов: объектный (а), компонентный (б) и концептуальный (в).

Проанализированы аналогичные системы мониторинга и контроля, такие как, АИС «Диспетчер», WinCC OA, системы мониторинга на АО «Станкопресс», ХААСП и СМБПП, и рассмотрены проблемы построения и контроля технологических процессов в условиях многорецептурного производства вафель.

На основе недостатков существующих систем контроля и проблем при изготовлении вафель для первого этапа модернизации производств была выполнена постановка задачи диссертационного исследования, заключающаяся в разработке методов и алгоритмов контроля технологических процессов производства вафель на основе цифровых двойников процессов (рис. 3).



Рисунок 3 — Схема модернизации производства.

**Глава 2 «Разработка методов и алгоритмов контроля многорецептурного технологического процесса производства вафель на основе технологии цифрового двойника».** В начале второй главы сформулированы требования нового подхода к контролю технологических процессов производства вафель, среди которых были выделены такие, как гибкость, масштабируемость, возможность оперативного анализа и систематизация собираемых данных. На основе этих требований и дополнительно проведённой оценки применимости концепции цифровых двойников была решена вторая задача диссертационного исследования — разработка концептуальной модели контроля технологических процессов производства вафель. Эта модель (рис. 4, а) описывает основную идею диссертационного исследования, обладающую научной новизной, которая заключается в применении двух типов связанных цифровых двойников к контролю рассматриваемых технологических процессов.

Для описания предложенной модели были введены новые сущности в соответствии с условиями применения. Первый тип двойников строится на основе требований к технологическому процессу ( $\alpha$ -ЦД), а другой — на основе реальных данных, получаемых при реализации технологических процессов и связан с партией ( $\beta$ -ЦД) (рис. 4, б).

Благодаря, структуре концептуальной модели был сформирован список методов и алгоритмов необходимых для описания и реализации нового подхода к контролю технологических процессов и разработки соответствующей методики.

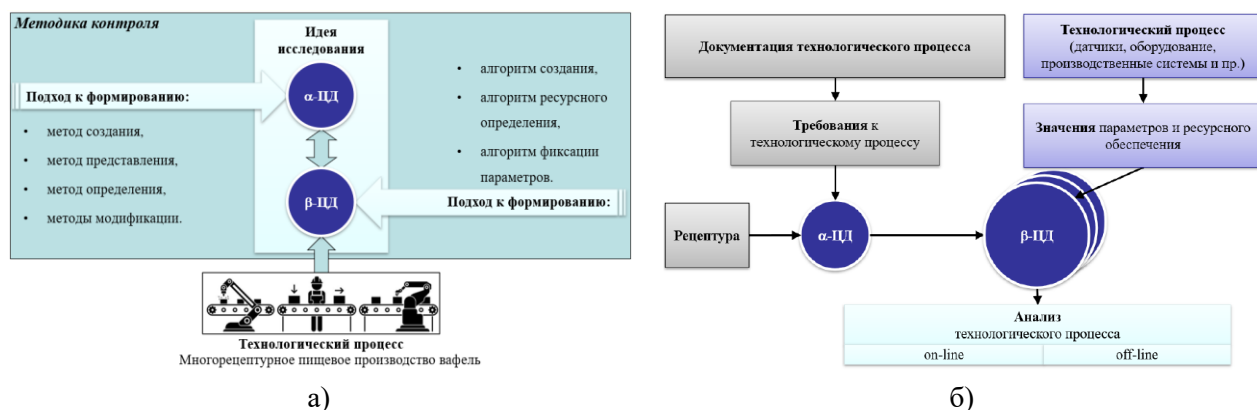


Рисунок 4 — Концептуальная модель (б) и её структура (а) для контроля технологических процессов на основе технологии цифровых двойников.

Во-первых, был описан метод создания цифровых двойников технологических процессов производства вафель, который базируется на основе концептуальной модели контроля процессов, и в нём конкретизированы этапы применения таких двойников, источники данных и генерируемая отчётность (рис. 5).



Рисунок 5 — Метод создания цифровых двойников технологического.

Во-вторых, в работе предложен метод представления обоих типов двойников, который описывается иерархической объектно-ориентированной структурой параметров технологического процесса производства вафель. Этот метод реализован в виде четырёхуровневой иерархической структуры (рис. 6, а), состоящей из класса и подклассов. Для хранения требований и значений предложена обобщённая объектно-ориентированная концептуальная структура цифровых двойников обоих типов (рис. 6, б). Структура и метод создания предполагают автоматизированное преобразование документации в цифровой

двойник технологического процесса, при котором  $\alpha$ -ЦД дополняется полями, необходимыми для фиксации параметров технологического процесса и его ресурсного обеспечения. Структуры параметров и цифровых двойников образуют цифровую информационную модель технологического процесса производства вафель.

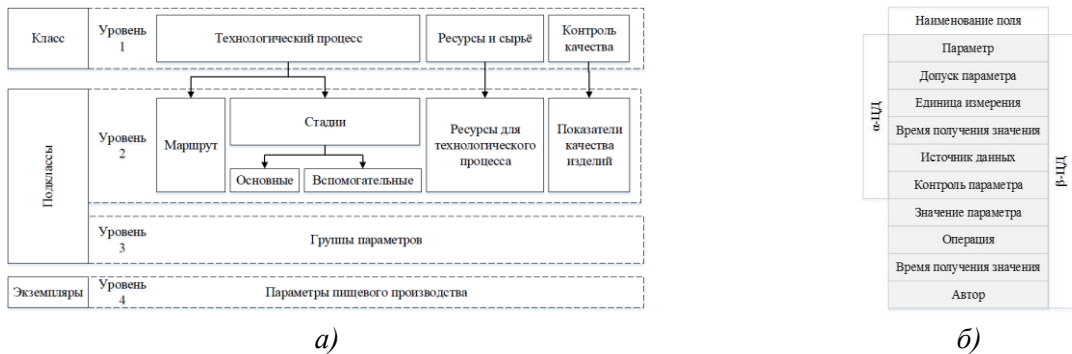


Рисунок 6 — Объектно-ориентированная структура параметров и ресурсов цифрового двойника технологического процесса (а) и концептуальная структура  $\alpha$ -ЦД и  $\beta$ -ЦД (б).

В-третьих, был предложен метод определения цифровых двойников (табл. 1), описывающий степень сформированности этих двойников на каждой стадии производства и выставляющий требования к использованию их на разных стадиях жизненного цикла изделия, которые заключаются в том, какие значения должны быть внесены в двойник на том или ином этапе.

Таблица 1 — Метод определения цифровых двойников технологических процессов по степени их определённости.

Стадии жизненного цикла цифрового двойника технологического процесса	Разработка рецептуры	Проектирование	Производство			Завершение заказа	Эксплуатация и возобновление
			I	II	III		
Этапы контроля технол. проц.	—		I	II	III	IV	—
Цифровые двойники	$\alpha$ -ЦД	НО	О			ПО	
	$\beta$ -ЦД	НО		О		ПО	

Также описан метод модификации цифровых двойников (рис. 7), определяющий пути внесения изменений в цифровые двойники на основе внешних и внутренних 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 версии цифрового двойника вследствие внешних причин, связанных с изменением основных характеристик

изделия, состава, материала, изменения производственных условий и т.д., а под внутренней — процесс совершенствования двойника без создания новой версии вследствие внутренних причин, связанных с ошибками при разработке, мероприятиями по повышению эффективности производства и т.п.

Рассмотрена схема применения алгоритмов применения цифровых двойников для контроля технологических процессов, которые были формализованы далее.

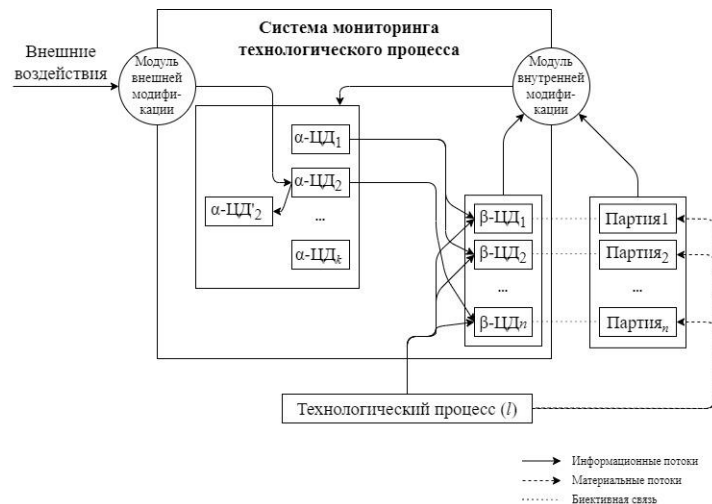


Рисунок 7 — Метод внешней и внутренней модификации цифрового двойника технологического процесса.

Далее предложена математическая модель системы контроля технологических процессов производства вафель с использованием теории множеств, где описано пять видов математических отображений множеств двойников, параметров и технологических процессов (табл. 2). Создание этой модели обусловлено необходимостью наложения ограничений на связи элементов отображения для последующей разработки модели данных и выполнения дальнейших расчётов оценки необходимого объёма хранилищ.

Таблица 2 — Отображения математической модели системы мониторинга.

Отображение	Множества	Пояснения	
$f_1: A \rightarrow \Gamma,$ $f_1(\alpha) = \gamma$	A — множество $\alpha$ -ЦД B — множество $\beta$ -ЦД $\Gamma$ — множество	$\Gamma = (\gamma^{(1)}, \gamma^{(2)} \dots \gamma^{(l)}), A = \{\alpha^{1(l)}; \alpha^{2(l)}; \dots; \alpha^{k(l)}\},$ $k \in N$ – номер $\alpha$ -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 $\beta$ -ЦД (номер изделия).	
$f_3: \Delta \rightarrow A,$ $f_3(\delta) = \alpha$	технологических процессов $\Delta$ — множество		
$f_4: \Delta \rightarrow B,$ $f_4(\delta) = \beta$			параметров технологического процесса
$f_5: \Delta \rightarrow \Gamma,$ $f_5(\delta) = \gamma$			

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

$$\begin{aligned} (\forall \alpha, \alpha' \in A): (\alpha \neq \alpha') \not\Rightarrow (f_1(\alpha) \neq f_1(\alpha')), \\ (\forall \beta, \beta' \in B): (\beta \neq \beta') \not\Rightarrow (f_2(\beta) \neq f_2(\beta')), \\ (\forall \gamma \in \Gamma)(\exists \alpha \in A): \gamma \neq f_1(\alpha), (\forall \alpha \in A)(\exists \beta \in B): \alpha \neq f_2(\beta). \end{aligned}$$

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

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

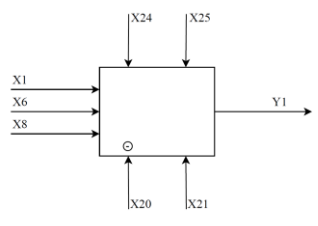
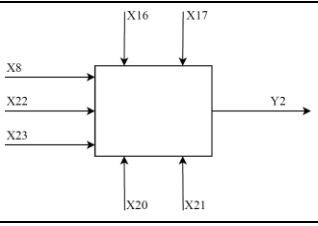
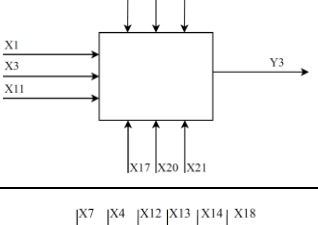
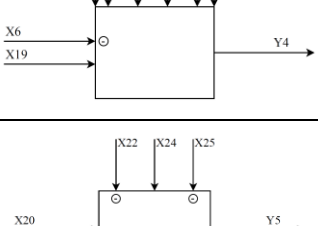
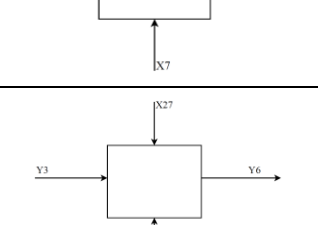
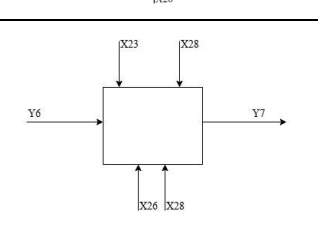
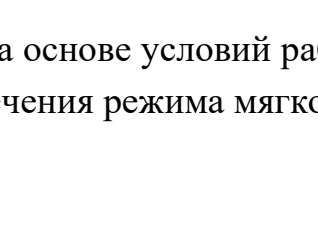
Данная математическая модель является основой для разработки информационной модели системы контроля технологических процессов и её модели данных с возможностью оценки необходимого объёма хранилищ для цифровых двойников.

В рамках решения пятой задачи диссертационного исследования на основе параметров технологического процесса производства вафель, рассмотренных в первой главе и экспериментальных исследований на базе предприятия по производству вафель выполнено структурно-параметрическое и математическое моделирование. В ходе обработки экспериментальных данных были получены: матрицы коэффициентов корреляции, регрессионная матрица связей и матрица безразмерных характеристик связей, которые позволили в результате получить математические модели связей параметров технологического процесса для последующей реализации подсистемы поддержки принятия решений. Также для параметрических моделей на основе математической обработки данных были определены входные, регулируемые и контролируемые параметры (табл. 3). Параметры, оказывающие слабое влияние на выход были исключены из математических моделей.

**Глава 3 «Разработка модели информационной системы и методики контроля технологических процессов производства вафель».** Эта глава посвящена разработке методики контроля технологических процессов изготовления вафель в условиях многорецептурного пищевого производства на основе концепции цифрового двойника и её апробации.

В первую очередь рассмотрены условия работы системы в многорецептурных производствах и возможности использования предлагаемой методики контроля технологических процессов на всех этапах жизненных циклов изделий, технологических процессов и их цифровых двойников технологических процессов (рис. 8).

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.
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 на 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.
7.		$Y_7 = 0,84Y_6 + 0,44X_{28}$	$Y_7$ — хрусткость при разламывании, $X_{28}$ — время охлаждения.

На основе условий работы системы контроля были определены требования обеспечения режима мягкого реального времени, которое составило  $T_p = 5$  мин.



для значений параметров технологических процессов, получаемых вручную, и  $T_d = 5$  с. при их автоматической фиксации.

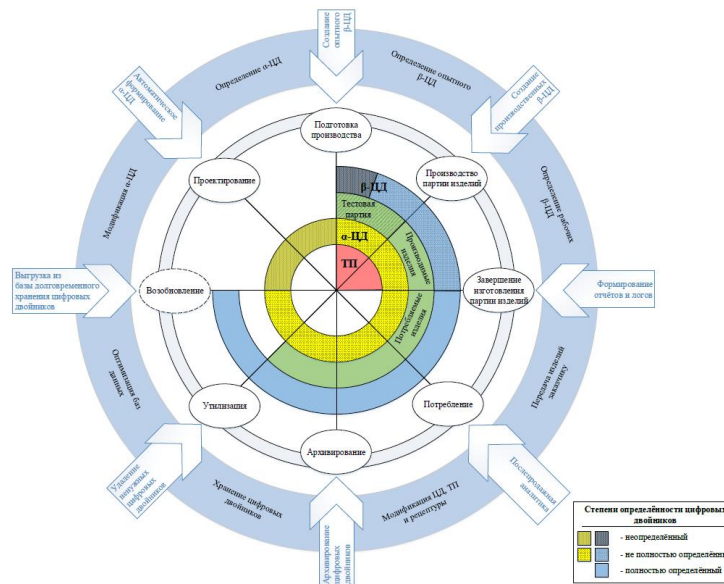


Рисунок 8 — Применение системы мониторинга на разных этапах жизненных циклов технологических процессов и их цифровых двойников.

После установления всех условий, требований и на основе рассмотренного в предыдущей главе комплекса методов и алгоритмов разработана концептуальная модель системы контроля технологических процессов в нотациях IDEF0 и IDEF3. В ходе структурно-функционального моделирования получены диаграммы на двух уровнях декомпозиции (рис. 7), описывающие методику контроля технологических процессов производства вафель. На контекстной диаграмме были выделены четыре основные функции системы: загрузка и коррекция  $\alpha$ -ЦД, ресурсное определение технологического процесса, фиксирование его параметров и анализ данных контроля.



Рисунок 7 — Диаграмма дерева узлов структурно-функциональной модели.

В завершении концептуального моделирования были получены диаграмма потоков данных (рис. 8) и диаграмма, описывающая связи цифрового двойника со всеми источниками информации при производстве. Данная модель определила информационные потоки и формы взаимодействия всех участников процесса производства и системы контроля технологических процессов, выявила потребность использования двух типов хранилищ цифровых двойников для оперативного доступа и долговременного хранения, а также показала механизмы формирования отчётности, логов событий, процедур модификации технологических процессов и цифровых двойников.

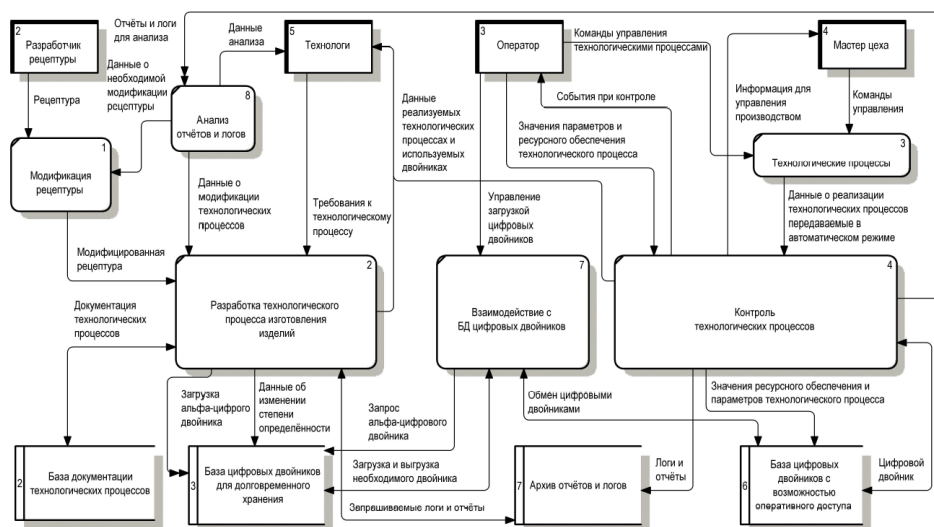


Рисунок 8 — Диаграмма потоков данных системы контроля технологических процессов при производстве вафель.

На втором этапе проектирования системы контроля технологических процессов проведено объектное моделирование системы контроля технологических процессов производства вафель.

С использованием языка UML были разработаны диаграммы вариантов использования, классов (рис. 9) и последовательности взаимодействия. Создание диаграммы классов позволило показать проект структуры обоих типов цифровых двойников и на основе математической модели системы, разработанной ранее, удалось получить методику оценки объёма данных для хранения множеств цифровых двойников.

Введя обозначения  $|A|$  и  $|B|$  как мощности множеств  $\alpha$ -ЦД и  $\beta$ -ЦД и  $V_{\alpha_i}$  и  $V_{\beta_i}$  — объёмы данных, необходимые для хранения значений полей (атрибутов) соответственно  $\alpha$ -ЦД и  $\beta$ -ЦД, получено уравнение оценки объёма хранилища цифровых двойников:

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

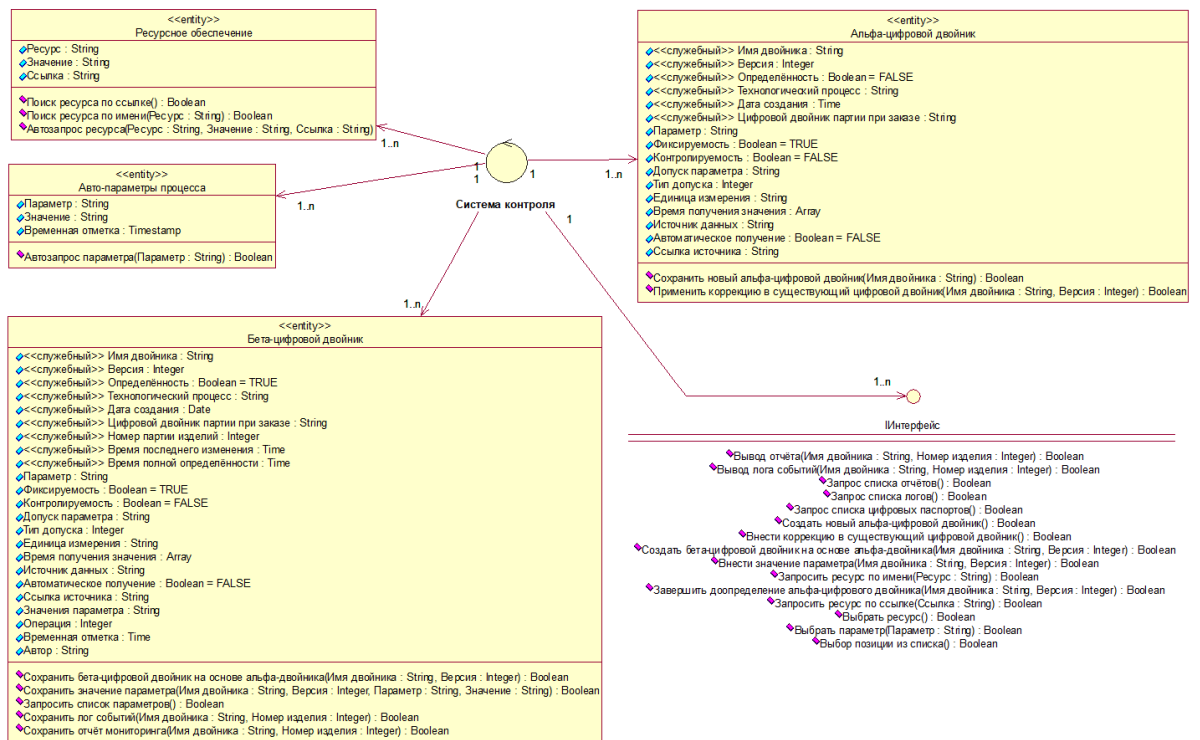


Рисунок 9 — Диаграмма классов системы мониторинга технологических процессов.

Далее в работе разработаны алгоритмы создания, фиксации параметров и ресурсного обеспечения цифровых двойников (рис. 10).

Алгоритм загрузки цифрового двойника (рис. 10, а) построен на основе методов его создания и представления, где реализованы возможности коррекции технологическим двойником и автоматическая проверка корректности структуры при загрузке перед выполнением процесса контроля технологических процессов.

Алгоритмы фиксации параметров (рис. 10, в) и ресурсного обеспечения (рис. 10, б) построены на основе сопоставления требований к ним и реально получаемым значениям от датчиков и промышленного оборудования, применяемого при реализации технологических процессов. В первую очередь реализован алгоритм ресурсного определения, где в случае необходимости оператор запрашивается допоставка ресурсов со склада или накопителей с повторной проверкой соответствия требованиям, внесённым в цифровой двойник, по маркировке на упаковке и реализацией разных сценариев в зависимости от полученных результатов. Затем предложен алгоритм фиксации параметров с возможностью ручного ввода при отсутствии возможности автоматизированного получения данных.

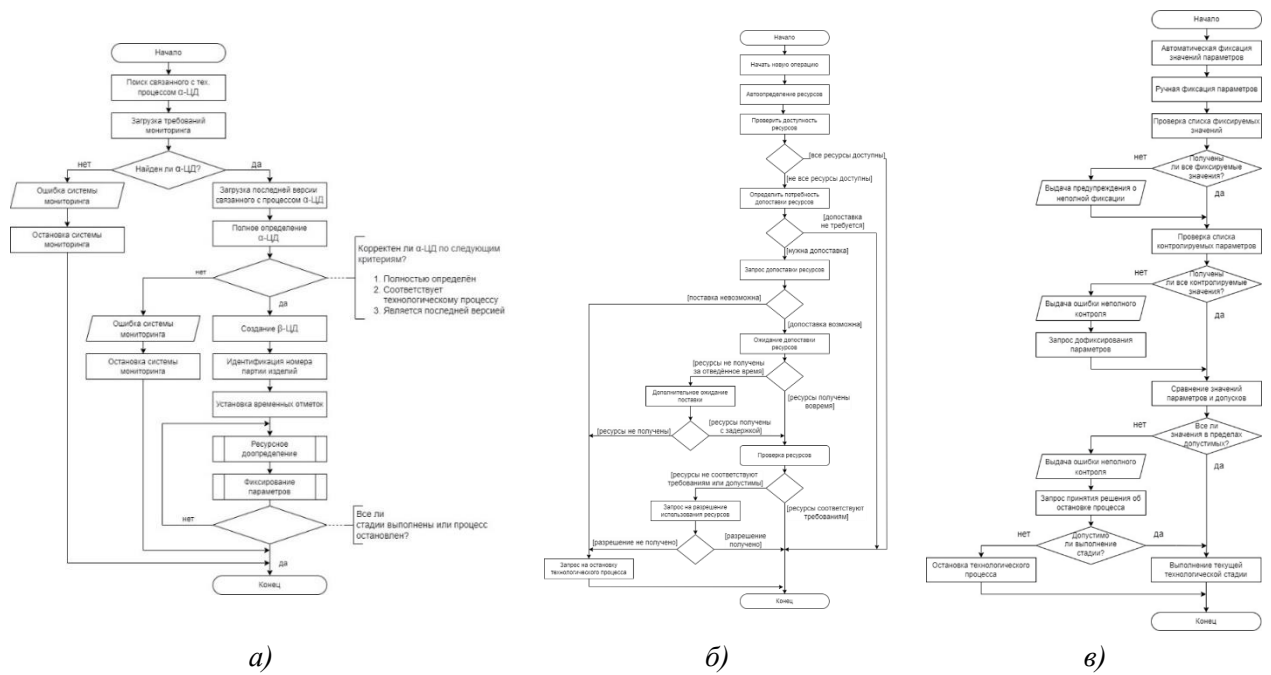


Рисунок 10 — Алгоритм загрузки  $\alpha$ -ЦД (а), алгоритм ресурсного доопределения технологического процесса (б), алгоритм фиксации параметров технологического процесса (в).

В последней части главы выполнено описание апробации разработанной методики мониторинга технологического процесса на основе действующих производственных участков ОАО «Рот Фронт» холдинга ООО «Объединённые кондитеры».

В качестве примера управляющего воздействия, которое может реализовываться на основе данных контроля технологических процессов, спроектирована (рис. 11) и разработана подсистема поддержки принятия решений, использующая ранее полученные математические и структурно-параметрические модели.

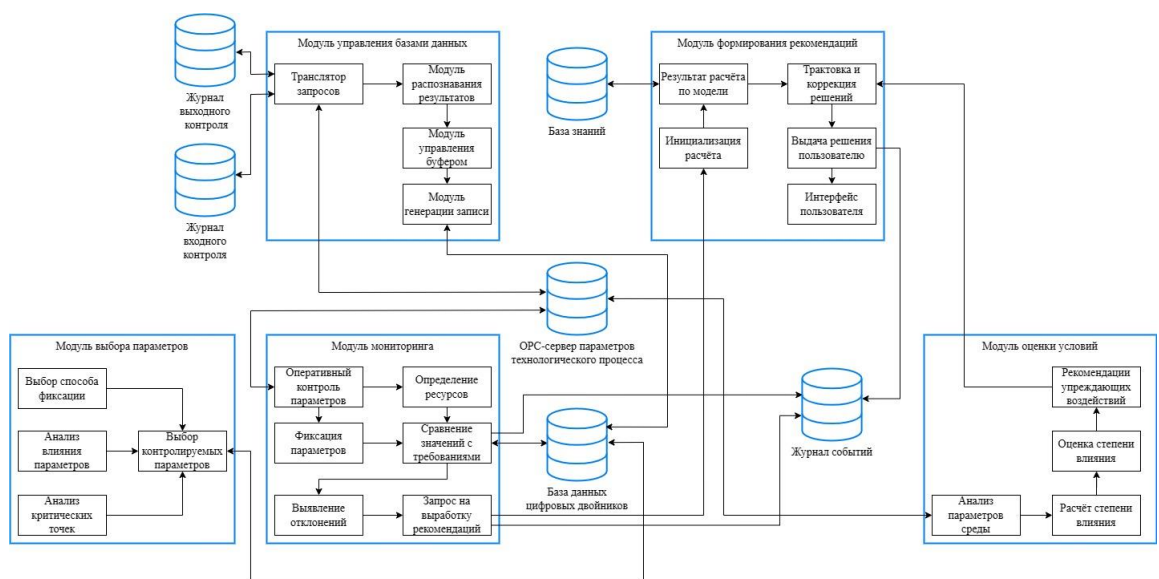


Рисунок 11 — Архитектура подсистемы поддержки принятия решений.

На основе анализа параметров технологического процесса, выполненного в главе 1 и диаграммы классов (рис. 9) разработана модель базы данных (рис. 12) системы контроля технологических процессов производства вафель, объединяющая оба типа цифровых двойников, рецептуры, требования к технологическому процессу и данные входного и выходного контроля.

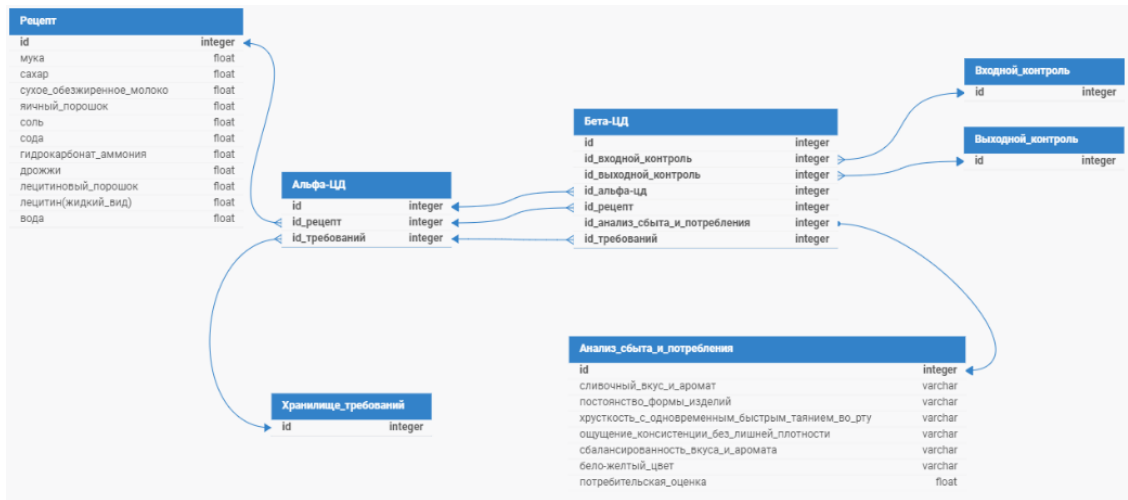


Рисунок 12 — Корневая модель базы данных цифровых двойников.

Реализация описанной в диссертационной работе методики контроля технологических процессов производства вафель, подсистемы поддержки принятия решений и модели базы данных была выполнена в составе SCADA-системы (рис. 13).

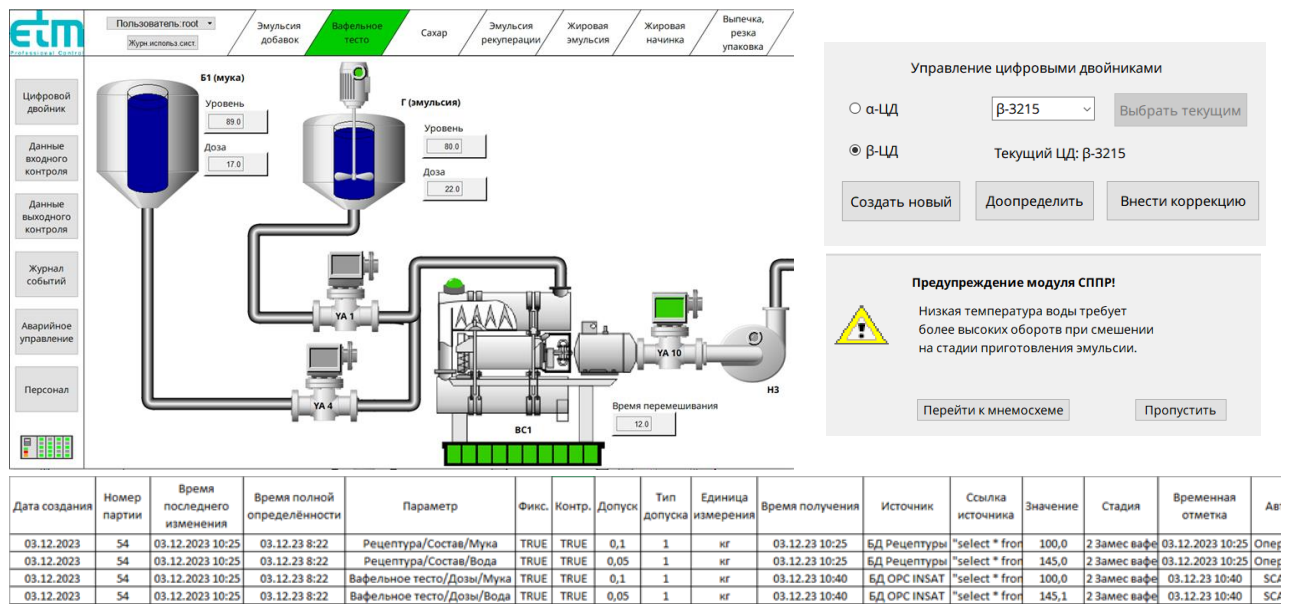


Рисунок 13 — Интерфейс SCADA-системы с возможностью управления цифровым двойником партии.

При разработке методики контроля технологических процессов принципы многорецептурного производства удовлетворены через обеспечение работы системы в режиме мягкого реального времени, цифровизация процессов обеспечена через использование технологии цифровых двойников, модульность и децентрализация — через применение разрозненных хранилищ и клиент-серверной архитектуры, сервисная ориентированность — через обеспечение практической значимости в виде представления инструментария для формирования дополненных цифровых паспортов изделий, информационного обеспечения на разных стадиях жизненного цикла изделий, а также информационного сопровождения процессов переналадки и модификации системы и технологических процессов, а совместимость — через возможность автоматизированной загрузки требований из документации и неограниченный выбор подключаемых устройств.

**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 и таблицы использованных статистических данных.

## **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

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

Выполнен анализ существующих систем контроля технологических процессов и их классификация в соответствии с концепцией умного (высокотехнологичного) производства, который позволил выделить существующие проблемы по теме диссертационного исследования и актуальность разработки методов и алгоритмов цифрового технологического мониторинга.

Разработана концептуальная модель контроля многорецептурного производства кондитерской отрасли, которая позволила сформулировать основную идею диссертационного исследования, заключающуюся в модифицировании задач сбора данных на уровне АСУ ТП через применение двух типов связанных цифровых двойников.

Разработана цифровая модель технологического процесса производства вафель на основе технологии цифрового двойника, обеспечивающая хранение значений параметров и ресурсного обеспечения всех стадий жизненного цикла

изделий, что стало основой для формализации нового подхода к проектированию информационного обеспечения АСУ ТП.

Разработан комплекс методов и алгоритмов контроля параметров производства вафель и его ресурсного обеспечения, повышающий эффективность сбора данных, необходимых при модернизации и проектировании технологических процессов.

Разработана информационная модель и методика контроля технологических процессов производства вафель, обеспечивающая применение цифрового двойника партии в условиях многорецептурного пищевого производства вафель с возможностью адаптации к другим условиям и типам производств.

Разработаны 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 и предупреждению нештатных ситуаций на предприятии, 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 и применения комплекса методов и алгоритмов автоматизированного контроля технологических процессов производства вафель с реализацией подсистемы поддержки принятия решений было достигнуто снижение количества отходов при производстве вафель.

## **СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**

### **В изданиях, рекомендованных ВАК РФ**

1. 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.

2. 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.

3. 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.



4. 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**

5. 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.

6. 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**

7. 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.

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

9. 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).

10. 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).