



МИНОБРНАУКИ РОССИИ
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«МИРЭА — Российский технологический университет»
РТУ МИРЭА

На правах рукописи

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)

Д и с с е р т а ц и я
на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
Холопов Владимир Анатольевич
кандидат технических наук,
доцент

Москва — 2024

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
1 ОБЗОР СОВРЕМЕННЫХ МЕТОДОВ КОНТРОЛЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ	13
1.1 Современное состояние организации и управления технологическим процессом.....	13
1.2 Анализ научных исследований в области производственного мониторинга.....	34
1.3 Определение мониторинга технологического процесса.....	50
1.4 Цифровой двойник в производственных системах	52
1.5 Контроль технологических процессов многорецептурного пищевого производства.....	58
1.6 Выводы по главе 1.....	72
2 РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ И АЛГОРИТМОВ КОНТРОЛЯ МНОГОРЕЦЕПТУРНОГО ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ПРОИЗВОДСТВА ВАФЕЛЬ НА ОСНОВЕ ТЕХНОЛОГИИ ЦИФРОВОГО ДВОЙНИКА	73
2.1 Применение цифрового двойника в условиях многорецептурного пищевого производства	73
2.2 Методы создания, модификации, представления и структура цифрового двойника технологического процесса при его контроле	81
2.3 Метод определения цифрового двойника технологического процесса ..	89
2.4 Математическая модель системы контроля технологических процессов производства вафель	91
2.5 Разработка структурно-параметрических и математических моделей основных стадий производства вафель.....	96
2.6 Алгоритмы фиксации параметров и определения ресурсов при контроле технологических процессов	101
2.7 Выводы по главе 2.....	105
3 РАЗРАБОТКА МОДЕЛИ ИНФОРМАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ И МЕТОДИКИ КОНТРОЛЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ПРОИЗВОДСТВА ВАФЕЛЬ.....	107
3.1 Условия работы системы контроля технологических процессов производства вафель	107
3.2 Применение системы контроля на разных этапах жизненных циклов цифровых двойников, изделий и технологических процессов	108
3.3 Задача обеспечения режима реального времени при контроле технологических процессов	109

3.4	Разработка структурно-функциональной модели системы контроля технологических процессов производства вафель	111
3.5	Проектирование и разработка процедур применения системы контроля технологических процессов производства вафель	118
3.6	Апробация методики контроля для технологического процесса производства вафель	129
3.7	Проверка методики контроля технологического процесса в условиях мелкосерийного многономенклатурного производства.....	138
3.8	Выводы по гл. 3	143
	ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ.....	145
	СЛОВАРЬ ТЕРМИНОВ	147
	ПУБЛИКАЦИИ АВТОРА ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ	148
	СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	150
	ПРИЛОЖЕНИЕ 1	167
	ПРИЛОЖЕНИЕ 2	168
	ПРИЛОЖЕНИЕ 3	169
	ПРИЛОЖЕНИЕ 4	170
	ПРИЛОЖЕНИЕ 5	171

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы

Современный уровень развития науки и техники позволяет улучшать экономические показатели деятельности предприятий за счёт применения новых информационных технологий при модернизации действующих и создании новых технологических процессов. В то же время существует тенденция формирования индивидуализированного потребления, которая вынуждает предприятия расширять номенклатуру и уменьшать размер партии.

Эти тенденции увеличивают объём и значимость данных, которые генерируются на предприятиях в процессе реализации технологических процессов, что делает сбор и анализ этих данных более важными процессами при сокращении производственных издержек. Наибольшую значимость эти процессы имеют на предприятиях, производящих большую номенклатуру изделий при реализации большого числа технологических процессов. Таким образом, возникает проблема обеспечения эффективного мониторинга производственных данных, которая основывается на росте их объёма и отсутствии эффективных методов их сбора и анализа.

Ввиду обозначенных тенденций формирования более индивидуализированного производства и широкого применения информационных технологий на предприятиях можно утверждать, что проблема мониторинга на основе контроля и диагностики данных технологических процессов является актуальной. Это подтверждают положения действующих программ развития экономики РФ. В основе этих программ лежат стратегии развития цифрового производства, совершенствования алгоритмов и методов проектирования современных производственных систем, процессов конструирования, инжиниринга, одной из целей которых является повышение экономических показателей деятельности предприятий. Среди этих программ можно выделить следующие.

Во-первых, государственная программа «Развитие промышленности и повышение её конкурентоспособности» [229], задачами которой согласно паспортам подпрограммы 2, 5-7 являются построение высокоэффективных и высокотехнологичных производств, развитие цифрового производства и другие.

Во-вторых, национальная программа «Цифровая экономика», предполагающая использование перспективных сквозных информационных

технологий, например, большие данные, промышленный интернет, искусственный интеллект, виртуальная и дополненная реальность [39].

В-третьих, дорожная карта «Технет» Национальной технологической инициативы [109], поддержанная Президиумом Совета при Президенте Российской Федерации по модернизации экономики и инновационному развитию России 14 февраля 2017 года, также предлагающая совершенствование производств, повышение конкурентоспособности и эффективности российской экономики, а также применяемых технологий.

И, наконец, стратегическое направление в области цифровой трансформации обрабатывающих отраслей промышленности, которое согласно распоряжению Правительства Российской Федерации от 6 ноября 2021 г. № 3142-р предполагает формирование эффективной инфраструктуры и системы поддержки внедрения российского программного обеспечения и программно-аппаратных комплексов в рамках проекта «Умное производство».

Все обозначенные выше программы направлены на развитие российского производства, которое не представляется возможным без сбора большого объёма производственных данных с использованием современных информационных технологий на разных видах производств: пищевых, машиностроительных, фармацевтических и других.

В ходе проведения исследовательской работы рассматривались вопросы контроля разных технологических процессов, но основной акцент был сделан на многорецептурном производстве вафель. На основе проведённого обзора систем контроля технологических процессов были выявлены недостатки существующих систем, которые заключаются в том, что такие системы не способны в условиях многорецептурных производств в полном объёме решать задачи, связанные с охватом разных стадий жизненного цикла изделий, ограничениями в выборе параметров мониторинга и обеспечением цифровой трансформации предприятий. Стоит отметить, что в настоящем исследовании более подробно рассматривается задача мониторинга технологических процессов в части контроля из-за того, что основная идея заключается в формировании набора связанных данных для последующего анализа и применения для разных целей в дальнейшем. В связи с чем, по тексту будет чаще применяться термин «контроль», исходя из необходимости подчеркнуть, что сбор данных в АСУ ТП всегда ориентирован на решение управленческих задач.

На основе вышесказанного можно утверждать, что контроль технологических процессов в условиях многорецептурных производств является актуальной темой для проведения научных исследований.

Теоретические и практические исследования в области автоматизации технологических процессов и производств, проектирования технологических машин технологического оборудования и комплексов были проведены учёными Аверченковым В.И., Благовещенской М.М., Бирном Г., Каприханом Р., Клепиковым В.В., Мартиновым В.Г., Митрофановым В.Г., Мышенковым К.С., Соломенцевым Ю.М., Схиртладзе А.Г., Таралло А. [2, 36, 48, 51, 68, 73, 98, 106, 128, 131, 134, 146, 197] и другими.

Для решения задач моделирования, анализа и управления технологическими процессами применяется контроль и мониторинг параметров технологических процессов, вопросы которого также были рассмотрены в работах 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. [12, 20, 51, 85, 95, 96, 107, 116, 119, 122, 127, 155, 202, 215] и других авторов.

В соответствии с современными трендами применения концепции умного производства (в том числе цифровых двойников) задачи контроля технологических процессов стали решаться на основе её положений. Вопросами применения технологий этой концепции 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. [24, 25, 60, 70, 84, 142, 224] и другие.

В ходе проведения обзора научной литературы в области цифрового технологического контроля были рассмотрены различные диссертационные работы по теме настоящего исследования. Среди них можно выделить работы, посвящённые мониторингу технологических процессов, которые были выполнены такими авторами, как Игнатъев С.А., Рассолов Т.В., Семенов Г.В., Сидоров А.С., Юань Т., Кешари А. и Пирттиоя Т. [44, 75, 86, 95, 121, 161, 187]. Вопросами обеспечения качества на основе контроля в своих диссертационных исследованиях занимались Васильков А.В., Воробьев Н.В., Игнатъев С.А., Тихомиров В.В. [28, 30, 44, 107]. С учётом обозначенного акцента данной диссертационной работы на технологический процесс по производству вафель были рассмотрены соответствующие этому объекту

исследований работы Алёшиной Ю.А., Савенковой Т.В., Старшова Д.Г., Лейберовой Т.В., Тамазовой С.Ю. [5, 65, 91, 101, 104].

Несмотря на наличие большого числа публикаций, посвящённых контролю технологических процессов, на сегодняшний день не полностью решены проблемы контроля технологического процесса в условиях многорецептурного и мелкосерийного многономенклатурного производства; организации и мониторинга единого информационного пространства; постадийного мониторинга жизненного цикла производимых изделий на предприятиях пищевого производства; вопросы сбора данных в структурированном виде для решения задач проектирования и модернизации технологических процессов.

Процесс изготовления вафельных изделий является классическим примером многорецептурного производства, где рассмотренные выше проблемы актуальны [3, 101], существует множество нечётких зависимостей параметров, большую роль играет влияние человеческого фактора, а традиционные методы сбора данных малоэффективны, поэтому было принято решение разработки новых методов и алгоритмов автоматизированного контроля технологических процессов применительно к производству вафельных изделий. Стоит отметить, что для решения указанных проблем технология цифровых двойников процессов может показать свою эффективность.

В данном диссертационном исследовании был учтён опыт рассмотренных публикаций по теме работы, а также были изучены и проанализированы полученные в них результаты.

Таким образом, на основании вышеизложенного тему настоящего **диссертационного исследования** «Разработка методов и алгоритмов автоматизированного контроля технологических процессов производства вафель на основе цифрового двойника» можно считать актуальной и соответствующей **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 и задачи исследования

Целью диссертационной работы является разработка методов и алгоритмов построения системы контроля технологических процессов для обеспечения анализа и повышения эффективности производства вафельных изделий на основе цифрового двойника.

Для достижения поставленной цели были решены следующие научные **задачи**:

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.

Объектом исследования является технологический процесс изготовления вафель многорецептурного пищевого производства.

Предметом исследования является контроль параметров и ресурсного обеспечения процесса производства вафель.

Методы и средства исследования

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 и теоретическая значимость

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 решения задач сбора и систематизации данных в АСУ ТП.

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 α -ЦД и β -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.

Практическая значимость работы состоит в том, что полученные результаты позволяют:

- обеспечивать 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;
- обеспечивать возможность анализа данных параметров технологических процессов многорецептурного производства вафель в режиме реального времени и сокращать время решения комбинированных задач анализа технологических процессов;
- 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,
- решать различные задачи анализа и управления технологическими процессами, как например, реализация поддержки принятия решений на базе предлагаемого комплекса методов и алгоритмов контроля.

Основные результаты диссертационного исследования прошли апробацию и были переданы для внедрения на ОАО «Рот-Фронт» Холдинга «Объединённые кондитеры», ООО «Векас» и ООО «ЭлитМатик» (прил. 1-3).

Также некоторые результаты настоящего диссертационного исследования были внедрены в учебные дисциплины кафедры промышленной информатики ФГБОУ ВО «МИРЭА — Российский технологический университет», которые преподаются в рамках образовательных программ подготовки бакалавров и магистров по направлениям 09.03.01 «Информатика и вычислительная техника», 15.03.04 «Автоматизация технологических процессов и производств», 15.04.04 «Автоматизация технологических процессов и производств» (прил. 4).

Личный вклад автора

Результаты данного диссертационного исследования заключаются в выполнении лично автором полного объёма исследований в рамках поставленных целей и задач этой работы, включая идею применения двух типов связанных цифровых двойников, комплекс методов и алгоритмов их применения при контроле технологических процессов, а также разработку

набора иллюстративного материала по теме диссертации, представленного в данной рукописи.

Достоверность 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.

Апробация результатов работы

Основные положения диссертационного исследования были представлены на следующих конференциях:

1. XI Международная научно-практическая конференция «Актуальные научные исследования». Пенза. 5 апреля 2023.
2. VII Международная научно-практическая конференция «Современные аспекты научных исследований». Москва, 4 мая 2022.
3. International conference on Industrial Engineering, ICIE 2021. Sochi, 17-21 мая 2021 г.
4. II International scientific conference on applied physics, information technologies and engineering, APITECH. Krasnoyarsk, Russian Federation, 25 сентября – 4 октября 2020 г.
5. 2019 International Russian automation conference, Rusautocon 2019. Sochi, 08-14 сентября 2019 года
6. 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».

Публикации

По теме диссертации опубликовано 10 научных работ, из них 4 в изданиях, входящих в перечень ВАК РФ для кандидатских диссертаций и 2 публикации в журналах, проиндексированных в базе Scopus.

Структура и объем работы

Структура диссертации состоит из введения, трёх глав основного текста, заключения, словаря терминов и списка используемых источников. Общий объём работы включает 57 рисунков, 20 таблиц, 5 приложений, список литературы из 230 наименований и составляет 173 стр.

Благодарности

Автор выражает благодарность своему научному руководителю, к.т.н., доценту, Холопову Владимиру Анатольевичу и коллективу кафедры промышленной информатики Института искусственного интеллекта РТУ МИРЭА за помощь и поддержку при проведении данного диссертационного исследования.

1 ОБЗОР СОВРЕМЕННЫХ МЕТОДОВ КОНТРОЛЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

1.1 Современное состояние организации и управления технологическим процессом

1.1.1 Современные методы автоматизации технологических процессов и производств

Развитие производственной сферы оказывает непосредственное влияние на экономическое развитие страны, что стимулирует рост уровня жизни граждан и развитие государства в целом. В основе развития и модернизации экономики Российской Федерации и других стран лежит повышение эффективности труда, которое обеспечивается за счёт автоматизации различных процессов и производств.

Автоматизация процессов и производств, как направление научно-технического прогресса, развивается с начала XIX века, её методы и средства также совершенствуются [7, 13]. По прошествии четырёх промышленных революций производственные технологии прошли несколько этапов развития, начиная от механизации операций и заканчивая современными технологиями всеобщей цифровизации и интеллектуализации [118].

Современное производство нуждается в постоянном снижении затрат материальных и нематериальных ресурсов, в повышении общей эффективности на всех уровнях и этапах производства изделий [41, с. 7]. Для решения этих задач в эпоху всеобщей цифровизации в производстве и на этапах его подготовки стали применяться перспективные информационные технологии.

Обобщая практику создания современных систем организации и управления производством [13], можно сформулировать следующие основные принципы, согласно которым они функционируют:

- создание информационной платформы предприятия, формируемой на основе автоматизации бизнес-процессов на всех этапах жизненного цикла изделия (например, цифровая логистика, цифровое моделирование, цифровые двойники, управление проектами);
- объединение виртуального и реального мира в производственных системах и выпускаемых продуктах;
- становление нематериальных активов основным экономическим капиталом;

— внедрение новых производственных технологий (например, аддитивное производство, бережливое производство, автоматизированные рабочие места, цифровой инжиниринг и др.) [33, 188].

Применение перечисленных выше принципов организации производственных систем позволяет говорить о процессе трансформации производства и о появлении нового типа производства [124]. На основе данного процесса трансформации в некоторых странах были созданы концепции и программы развития производств: Индустрия 4.0 (Германия), Коалиция лидеров интеллектуального производства (США), Инициатива промышленной цепочки создания стоимости для умного производства (Япония), Программа умного производства (Южная Корея), стратегия развития промышленности «Умное производство» (Россия) и другие [198, 227].

В основе каждой программы развития лежит разный набор применяемых методов и подходов к созданию цифровых предприятий, однако наиболее часто применяются технологии моделирования [156, 186], системы сбора данных и организации менеджмента, обучения персонала [29, 82] и стандартизации [82, 147], осуществляется производственная интеграция систем управления с производственными, бизнес-процессами и цепочками поставок, в качестве перспективных цифровых технологий реализуются киберфизические системы, Интернет вещей [144], большие данные, облачные вычисления и интеллектуальная сенсорика [154, 224, с. 59].

На основе цифровизации процессов с применением перечисленных выше технологий и методов формируется новый тип производств, который называется «цифровым производством» [162]. До четвёртой промышленной революции этот термин применялся в основном в области конструкторско-технологической подготовки производства, однако сейчас в условиях интеллектуализации производственных систем он распространился на область самих производственных процессов на уровне цеха [1] и всего предприятия в целом.

Среди всех известных концепций создания предприятий нового поколения в России была наиболее популярна немецкая Индустрия 4.0, которая была поддержана на государственном уровне в рамках национальной технологической инициативы [109], а затем преобразована в стратегию развития и построения конкурентоспособного производства [229]. Основными

принципами создания предприятий в рамках этой стратегии (концепции) являются:

- модульность,
- совместимость,
- виртуализация,
- децентрализация,
- сервисная ориентированность,
- работа в режиме реального времени [173].

В качестве основных технологий и систем, применяемых в рамках этой концепции, используются:

- Интернет вещей,
- большие данные и бизнес-интеллект,
- интеллектуализация автоматизированных систем управления технологическими процессами (АСУ ТП),
- новые поколения интегрированных мехатронных устройств,
- киберфизические и промышленные киберфизические системы, организующие сеть физических и информационных компонентов в рамках единой среды,
- виртуальная и дополненная реальность,
- сервисно-ориентированная архитектура [57, 68, 144, 191].

В литературе при описании концепции Индустрии 4.0 встречается термин «умное производство», который, как показано в статье [198], является эквивалентом данной концепции. Можно утверждать, что умные производственные системы строятся по тем же принципам и с использованием тех же технологий, которые применяются для других решений концепции Индустрии 4.0 [109, 132, 171, 173]. Например, можно увидеть, как внедряются киберфизические системы [142, 166, 205], инструменты с интеллектуальными датчиками [204], инновационные интерфейсы [183], непосредственное документационное сопровождение операций в режиме реального времени [70], как в состав производственной информационной системы включается цепочка поставок [150] и т.д. Таким образом, можно допускать, что стратегия развития «Умного производства» в России коррелируется с концепцией Индустрии 4.0, а также можно определить множество общих характеристик с высокотехнологичным производством [90, 230], поэтому далее в работе группу обсуждаемых программ и терминов будем обобщённо относить к термину «Умное производство».

Обобщая различные решения, описанные в литературе, были обозначены следующие основные свойства умных производственных систем [175]:

- 1) контекстная осведомлённость (идентификация, положение, статус и самосознание),
- 2) модульность,
- 3) неоднородность,
- 4) композиционность,
- 5) совместимость,
- 6) интеллектуальное управление,
- 7) энергоэффективность,
- 8) кибербезопасность,
- 9) визуальные технологии,
- 10) аналитика данных.

Описанные выше тенденции были сформированы не только на основе развития науки и техники, но и на основе изменений потребительского спроса, который сформировался в конце XX в.

Современный спрос на производственные товары характеризуется тем, что каждый клиент выдвигает собственные требования к готовой продукции, которые формируются на основе его нужд, желаний и ожиданий. Изученные публикации показали [108, 137], что те предприятия, которые способны выпускать продукцию, максимально адаптированную под требования заказчика, могут создавать товары с максимальной потребительской ценностью, а максимизация ценности и продаж товаров на рынке повышает маржинальность производства и его эффективность, поэтому, можно говорить о том, что современный спрос и удовлетворяющее его предложение на основе производства являются индивидуализированными (кастомизированными).

Реализация кастомизированного подхода к удовлетворению спроса характеризуется двумя важными проблемами: с одной стороны, кастомизация ведёт к усложнению и удорожанию выпускаемой продукции, а с другой, направлена на удовлетворение спроса, при этом клиенты хотят получать кастомизированный продукт по цене серийного, следовательно, согласно экономической теории, существует точка равновесия, в которой уровень кастомизации и стоимость товара сбалансированы [160], например, современные автомобили имеют стандартную базовую (некастомизированную) комплектацию, но по желанию клиента могут быть дооснащены дополнительными опциями без внесения изменений в конструкцию автомобиля.

Таким образом, кастомизация производства направлена на создание потребительской ценности и удовлетворение запросов клиентов с учётом производственных возможностей, характеризующихся высокими уровнями инновационности, высокотехнологичности, адаптивности, гибкости и быстрой скорости реагирования на изменения внешней среды, что, в свою очередь, позволяет повысить производительность, экологичность и энергоэффективность процессов [1], обеспечить устойчивое развитие предприятия. Задачу кастомизации в условиях современных тенденций и рыночных условий невозможно решить без цифровизации всех процессов [108], влияющих на удовлетворение запросов клиентов, начиная с формирования предложения, процесса производства и заканчивая послепродажным обслуживанием.

Говоря о тенденциях формирования кастомизированного спроса и стремительного развития сферы информационных технологий, можно утверждать, что большое разнообразие современных методов и средств автоматизации появилось на стыке требований рынка и научно-технических возможностей, но при этом в каждом случае приходится решать задачу выбора необходимых технологий и систем, а решение этой задачи должно быть экономически обосновано и реализуемо в каждом случае [193].

Необходимость предприятия в повышении уровня кастомизации для повышения конкурентоспособности продукции и повышения её привлекательности на рынке повышает значимость других задач, решаемых на предприятии.

Во-первых, остаётся значимой задача повышения эффективности деятельности предприятия, которая в основном определяется за счёт экономических показателей прибыли с продаж кастомизированной продукции. Во-вторых, обозначенная выше задача повышения эффективности решается за счёт уменьшения материальных и нематериальных затрат [89, 199], например, посредством аутсорсинга различных процессов, применения информационных систем автоматизации процессов управления и др. В-третьих, должна решаться задача контроля потребляемых ресурсов, что может позволить оптимизировать затраты и процессы [197]. В-четвёртых, задача обеспечения конкурентоспособности предприятия является важной составляющей для устойчивого развития предприятия. В-пятых, современное производство, часть процессов которого уже выполняется не на его площадках, вынуждено осуществлять специализацию и реализовывать только

эффективные производственные стратегии, выпуская только те продукты, которые выгодно производить.

И наконец, кастомизированное производство должно обладать высокой степенью гибкости, быстро адаптироваться к новым требованиям клиентов и оперативно осуществлять переналадку оборудования для удовлетворения новых запросов клиентов.

Каждая из перечисленных выше задач связана с другими, и в условиях всеобщей цифровизации одной из главных проблем для предприятия становится сбор данных на всех этапах жизненного цикла продукта [78]. Высокая значимость этой проблемы обусловлена тем, что, например, без данных о расходе ресурсов невозможно выполнить его оптимизацию, без данных о реализуемых технологических процессах невозможно повысить эффективность обработки, осуществить эффективную загрузку и обслуживание оборудования, обеспечить рациональное планирование производства, также на этапе производства в цехе невозможно учитывать кастомизированные требования к производимым изделиям, что в целом замедляет все этапы жизненного цикла изделия, создаёт предпосылки для производства брака и повышения издержек [199].

Таким образом, на современных предприятиях значительно возросла ценность данных, поступающих от оборудования, предприятий-партнёров, клиентов и других участников жизненного цикла изделий, то есть для всех участников рынка важны данные, полученные в процессе анализа рынка, проектирования продукта, подготовки производства, эксплуатации и утилизации.

По причине растущей ценности данных, которые ранее не обрабатывались должным образом, были сформированы новые подходы к их анализу, поэтому на современных предприятиях стали широко применяться следующие виды аналитики данных:

- описательная,
- диагностическая,
- прогностическая,
- предписывающая.

Цель описательной аналитики заключается в фиксировании параметров продукта, внешней среды и режимов работы оборудования; диагностическая стремится выяснить причины ухудшения работы оборудования, прогностическая — сформировать закономерности, указывающие на

неизбежные события, предписывающая — определить пути достижения лучших результатов деятельности и устранить возникающие проблемы [188].

Применение аналитических методов трансформирует необработанные данные в обработанные, которые могут быть полезны всем участникам рынка: партнёрам, предприятиям и клиентам. Данные аналитики могут использоваться партнёрами, например, для активизации обмена ресурсами между участниками отношений, оптимизации цепочек поставок, рациональной организации хранения ресурсов и т.д., для производителей решение задачи снижения издержек и повышения эффективности становится более оптимальным, а клиенты, сбывающие произведённую продукцию, в рамках современных трендов индивидуализированного потребления, получают товары, отвечающие их собственным требованиям и запросам, а предложение для них становится кастомизированным [1, 17, 94, 171].

В условиях цифровизации и применения различных информационных систем и технологий на производстве, которые получают данные на разных уровнях производства и этапах жизненного цикла изделия, а также при наличии потребности в анализе этих данных возникает проблема их сбора для последующего анализа. Решением данной проблемы может быть мониторинг данных, который будет применяться на всех этапах жизненного цикла изделия и производственных уровнях [121].

Было показано [202], что, например, на уровне цеха контроль технологических процессов позволяет предприятиям решать задачи повышения эффективности производства, уменьшения издержек, контроля качества выпускаемой продукции и др. Эти задачи коррелируются с теми, которые были описаны ранее и поставлены перед предприятиями, удовлетворяющими кастомизированный спрос клиентов.

1.1.2 Этапы развития контроля и мониторинга технологических процессов

Научный интерес к контролю производственных данных и мониторингу технологических процессов был обозначен в СССР во второй половине XX века. С того времени начинают бурно развиваться методы активного контроля в машиностроении. Основными учёными, которые внесли большой научный и практический вклад в этой области, принято считать Е.И. Педея, А.В. Высоцкого, В.М. Машинистова, А.В. Хуртасенко и ряд других [49]. Тогда признавалось, что применение средств активного контроля увеличивает производительность труда, позволяет применять многостаночное

обслуживание и комплексную автоматизацию технологических процессов, повышает качество продукции за счёт повышения точности, долговечности и надёжности как изделий, так и применяемого оборудования.

Затем стали создаваться различные системы компенсации погрешностей, а с появлением станков с числовым программным управлением (ЧПУ) эта тенденция получила дополнительные стимулы к развитию. Например, в различных областях обработки решались задачи повышения точности, улучшения качества сборки, минимизации влияния источников тепла на производственные процессы и применялась активная коррекция погрешностей [4, 34, 81, 110, 114].

В XXI веке под влиянием четвёртой промышленной революции контроль технологических процессов вышел на новый уровень и принял вид интегрированной информационной системы мониторинга, а этап проектирования, к которому относился термин «умное производство», перерос в сложный мультидисциплинарный процесс с применением сложных моделей расчёта с помощью суперкомпьютеров [23, с. 27].

Современный мониторинг технологических процессов может быть эффективно применён в условиях кастомизированного производства, когда выпускается большая номенклатура изделий. Такое производство организуется в основном на малых и средних предприятиях [137, 194], характеризующихся небольшими объёмами партий и большой номенклатурой изделий, где конкретный вид изделий выпускается по индивидуализированным требованиям потребителя.

Из-за малых размеров партий и большого объёма применяемого оборудования производственные системы на таких предприятиях при трансформации в интеллектуальное производство строятся по принципу модулей, которые имеют конкретную целевую ориентированность в цепочке создания потребительской ценности. Такие модули обладают характеристиками высокотехнологичности и специализированности, поэтому предприятия, построенные по подобному принципу с налаженными инфокоммуникационными каналами, имеют значительное преимущество в эффективности функционирования по сравнению со своими предшественниками. Производственные циклы на таких предприятиях уменьшаются в пространственном и временном отношениях [108], что позволяет реализовывать на предприятии одновременно несколько технологических процессов обработки изделий, нуждающихся, как и прежде, в документальном и техническом сопровождении [70].

Внедрение систем комплексной автоматизации должно быть экономически оправдано, поэтому нельзя не согласиться с тем, что при внедрении систем мониторинга технологических процессов на производствах следует учитывать результирующую эффективность всех проведённых действий с учётом понесённых затрат.

Современные производства всё чаще строятся для выпуска широкой номенклатуры изделий. Например, в пищевом производстве одновременно в рамках одной площадки или цеха реализуется несколько рецептур, а в машиностроительном — выпускается несколько изделий. Внедрение системы контроля технологических процессов в условиях многорецептурного пищевого или мелкосерийного многономенклатурного машиностроительного производства может позволить эффективно интегрировать системы разных производственных уровней и контролировать качество выпускаемых изделий в режиме реального времени. На основе такой системы, организованной по модульному принципу, могут проводиться предиктивный анализ в режиме реального времени с возможностью быстрого реагирования на возникающие проблемы, мероприятия по адаптации, способствующие устранению проблем и быстрой переналадке оборудования, а также приниматься решения на уровне цеха, влияющие на всё производство в целом с целью модернизации действующих производств или построения новых [17, 97, 127, 182].

1.1.3 Основные тенденции развития современных производств

Трансформация предприятий в соответствии с положениями концепции умного (высокотехнологичного) производства может перевести их на качественно и количественно новый уровень эффективности производства. Однако, с учётом данных трансформационных процессов могут возникать проблемы обеспечения кибербезопасности предприятий, массовой безработицы и роста разрыва уровня развития между развитыми регионами и менее развитыми, увеличивая разрыв в уровне благосостояния населения [7, 39].

Несмотря на это, эффективность деятельности новых предприятий создаст основу для нового этапа развития науки и техники с учётом общемировых трендов и защиты окружающей среды, а применение систем контроля технологических процессов усилит данный эффект [113].

Подводя промежуточный вывод о современном состоянии организации и управления технологическими процессами, можно утверждать, что благодаря развитию науки и техники современное производство стало характеризоваться

высокой степенью цифровизации и интеллектуализации различных процессов. Высокий уровень развития информационных технологий и применение их на производстве позволили сформировать основу для создания предприятий нового типа, которые в литературе называются «цифровым производством», «умным заводом», «интеллектуальным производством», «высокотехнологичным производством» и т.д. Основным отличием производств такого типа является сбор и анализ различных данных в режиме реального времени на всех этапах жизненного цикла продукта, начиная с анализа рынка и заканчивая утилизацией изделий.

Таким образом, в обществе был сформирован новый тип потребления, отличающийся наличием индивидуальных требований к продукту со стороны клиента. На основе возможностей производства учитывать спрос и конъюнктуру рынка с помощью информационных технологий, позволяющих анализировать большой объём различных данных, и из-за спроса на рынке на кастомизированный продукт, а также из-за флуктуации параметров сырья и процессов предприятия стали реализовывать индивидуализированный подход к клиентам, производя кастомизированную под их нужды продукцию, что вынудило уменьшить размеры партий, увеличить номенклатуру выпускаемой продукции и организовывать всё больше многорецептурных и мелкосерийных многономенклатурных производств при групповом способе организации операций обработки.

На таких производствах данные о протекаемых технологических процессах имеют особую важность из-за того, что в условиях большой номенклатуры выпускаемых изделий одновременно реализуется несколько технологических процессов, в каждый из которых заложены индивидуализированные требования к выпускаемым изделиям.

Рост числа одновременно реализуемых технологических процессов стимулирует рост объёма данных о них, которые необходимо получать, собирать и обрабатывать для ведения эффективных стратегий развития предприятия.

Задача получения данных обычно решается на нижнем уровне АСУ ТП, для анализа данных применяются информационно-аналитические системы, а системы контроля технологических процессов осуществляют сбор данных и фиксацию параметров и ресурсного обеспечения технологических процессов.

Из-за появления новых типов производств актуальность проблемы контроля технологических процессов значительно выросла, так как до этого прежние типы производств не обладали такой номенклатурой и такими

объёмами производимых данных, поэтому их сбор осуществлялся с использованием более простых методов и систем [44]. Одновременно с этим, без осуществления контроля технологических процессов будет невозможен анализ производственных данных, что негативно повлияет на обеспечение эффективности производства и сокращение издержек.

Таким образом, можно утверждать, что ведение качественного подходящего для многорецептурных и многономенклатурных производств контроля технологических процессов будет являться эффективным решением проблемы сбора данных о технологическом процессе [130].

Ввиду необходимости в осуществлении контроля технологических процессов и реализации ряда программ развития новых типов производств в России и в мире [14, 39, 109, 121, 122, 193, 198], можно говорить, что проблема сбора данных на основе контроля и диагностики является актуальной на сегодняшний день и требует решения для развития производств в соответствии с особенностями современного рынка и развития цифровой экономики в РФ.

1.1.4 Тенденции развития автоматизации технологических процессов пищевой промышленности

В рамках данного диссертационного исследования более детально рассматриваются вопросы автоматизации пищевого производства, так как оно выбрано, как объект исследования данной работы.

Говоря о тенденциях развития подходов в области автоматизации пищевой промышленности, можно утверждать, что сегодня она развивается в соответствии со стратегией развития «Умное производство» [227], о которой говорилось ранее (п. 1.1.1-1.1.3). Это подтверждается тем, что помимо традиционных подходов по улучшению рецептур производства изделий пищевой промышленности [71] в данной области сформировалась широкая практика применения перспективных информационных технологий для построения эффективного высокотехнологичного производства [15, 19, 54, 61].

Отмечено [54], что применение современных информационных технологий и цифровизация процессов часто находит место именно при автоматизации в пищевой промышленности. При цифровизации процессов пищевой промышленности наиболее часто применяются такие технологии как: цифровые двойники, большие данные, машинное зрение, аддитивные технологии, киберфизические системы, дополненная реальность,

промышленный интернет вещей и другие [15, 31, 54, 61], отдельно необходимо отметить программу развития отрасли в рамках научно-технологической инициативы «FoodNet» [61].

Изучение научных публикаций в области подходов к автоматизации пищевой промышленности позволило выделить актуальные направления научных исследований, как цифровой технологический контроль, в том числе с применением технологии цифровых двойников [18, 31, 59, 79], задачи в области модификации взаимоотношений между предприятием и поставщиком [86], задачи построения умных высокотехнологичных предприятий и поддержки принятия решений для пользователей предприятий и потребителей на основе информации со всех стадий жизненного цикла изделий [11, 15].

1.1.5 Описание технологического процесса изготовления вафель

Производство кондитерских изделий осуществляется на поточных линиях, характеризующихся высокой степенью автоматизации процессов с применением передовых промышленных информационных технологий для сбора и анализа производственных данных. Эти технологии позволяют организовывать современное эффективное высокотехнологичное производство при одновременной реализации нескольких рецептур выпускаемой продукции.

Сбор и анализ данных на производстве кондитерских изделий осуществляется с целью управления качеством выпускаемой продукции. Управление качеством на производстве кондитерских изделий необходимо по причине того, что нарушение условий и параметров реализации технологических процессов будет приводить к существенному ухудшению качеств выпускаемой продукции, таких как безопасность употребления продукта, органолептические характеристики, консистенция, визуальные показатели и пр.

Производству вафель, как одному из примеров производства кондитерских изделий, также присущи описанные выше характеристики, взаимосвязи и процессы. На это производство влияют такие процессы, как появление новых продуктов, составов и начинок, внедрение нового перспективного оборудования и постоянно меняющиеся потребности покупателей, что ведёт к реализации нескольких технологических процессов в рамках одного производства и его многорецептурности. Для осуществления эффективного сбора данных в условиях такого многорецептурного

производства необходима система контроля технологических процессов, которая позволяла бы собирать и систематизировать несвязанные между собой производственные данные для формирования необходимых управленческих решений, устранения и исключения возникновения ошибок по вине человека и тем самым снижения влияния человеческого фактора на качество выпускаемой продукции, которое возникает из-за большого числа неформализованных связей параметров технологических процессов.

В условиях кондитерского производства по изготовлению вафель оборудование может работать без остановки в течение нескольких часов, дней и месяцев, поэтому влияние человеческого фактора направлено в этих условиях на этапы проектирования и отладки технологических процессов и новых рецептур.

При производстве вафель основной технологической операцией является изготовление вафельных листов (рис. 1), которое осуществляется методом отливки и выпечки в полостях между двумя металлическими плитами с зазором 2-3 мм. Качество выполнения этой операции зависит от точности дозирования теста, на которое влияет его консистенция (вязкость, липучесть и пр.). При использовании теста с высокой вязкостью дозирование может осуществляться не точно, медленно с неравномерным распределением по поверхности металлической формы, что ведёт к изготовлению листов разной толщины и неравномерному пропеканию.

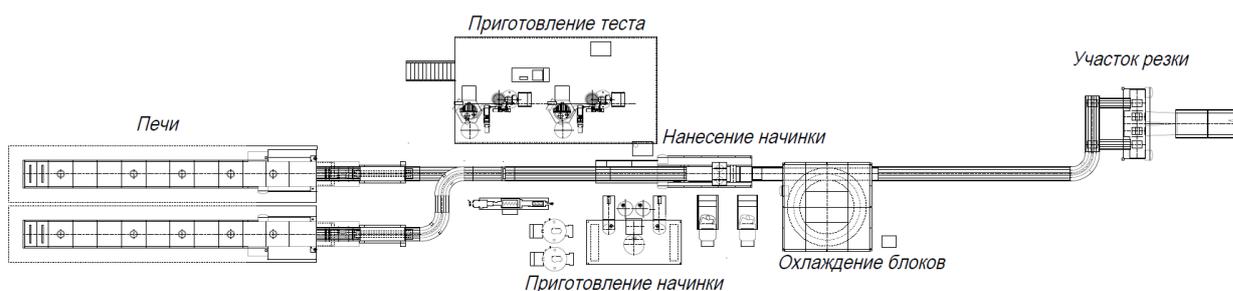


Рисунок 1 — Компонировка технологической линии по производству вафель.

На консистенцию теста влияет в первую очередь доля воды, температура и продолжительность замеса. Для получения изделий высокого качества необходима минимальная влажность теста, при которой обеспечивается устойчивая дисперсная система, не образующая агрегатов из частиц муки.

Выпечка вафель выполняется в течение 2-3 минут при температуре плит 150-170 °С, что обеспечивает удаление из теста значительной доли влаги.

После выпечки осуществляется охлаждение листов, которое может выполняться до 10 часов в тёплых камерах в стопках, но наиболее рационально охлаждение листов по отдельности и температуре помещения, что уменьшает время охлаждения до 2-3 минут.

На этой стадии изготовление листов завершено, к ним могут быть добавлены начинки. Далее вафли заворачивают во влагостойкие и жиро и маслонепроницаемые упаковочные материалы (пергамент, полимерная и комбинированная плёнка и т.д.), после чего вафли могут храниться от двух до шести недель до стадии реализации или утилизации.

Таким образом можно выделить следующие основные стадии изготовления вафель: подготовка сырья, приготовление теста и начинки, дозирование, выпечка, охлаждение, резка и упаковывание [31] — и рассмотреть функциональную схему автоматизации процесса (рис. 2-4).

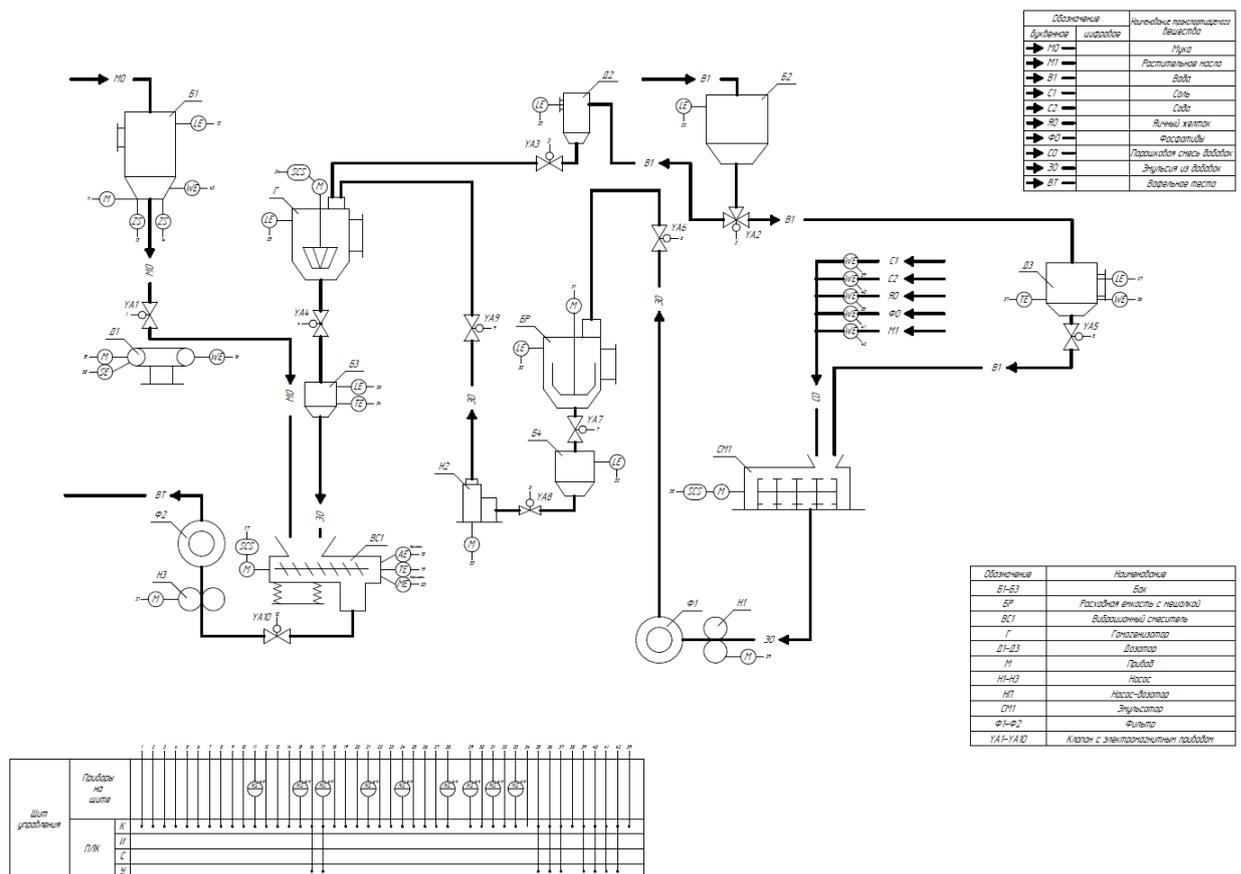


Рисунок 2 — Функциональная схема автоматизации процесса изготовления вафель. Часть 1.

На основе функциональной схемы автоматизации можно отметить, что данные собираются в ПЛК и используются классические методы и средства контроля параметров технологического процесса на аппаратном уровне.

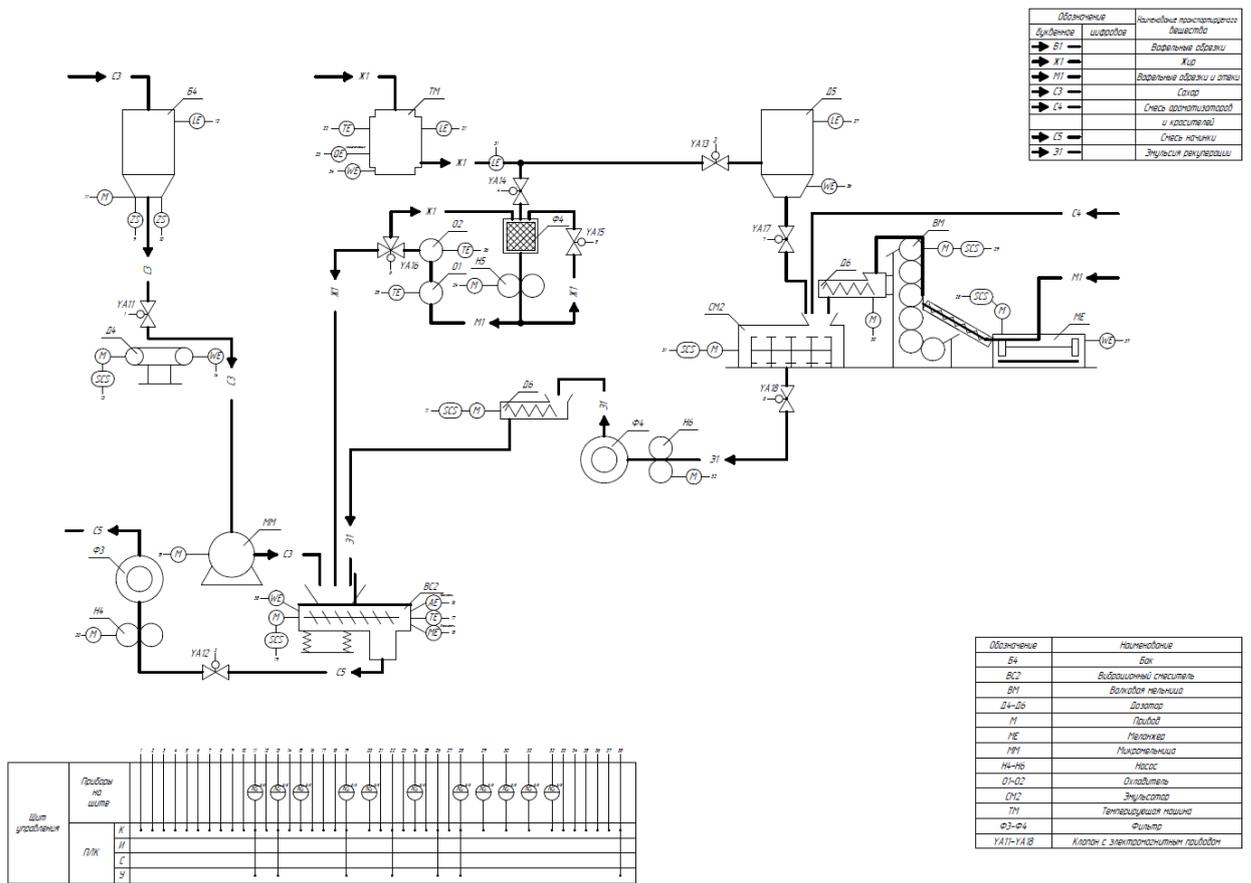


Рисунок 3 — Функциональная схема автоматизации процесса изготовления вафель. Часть 2.

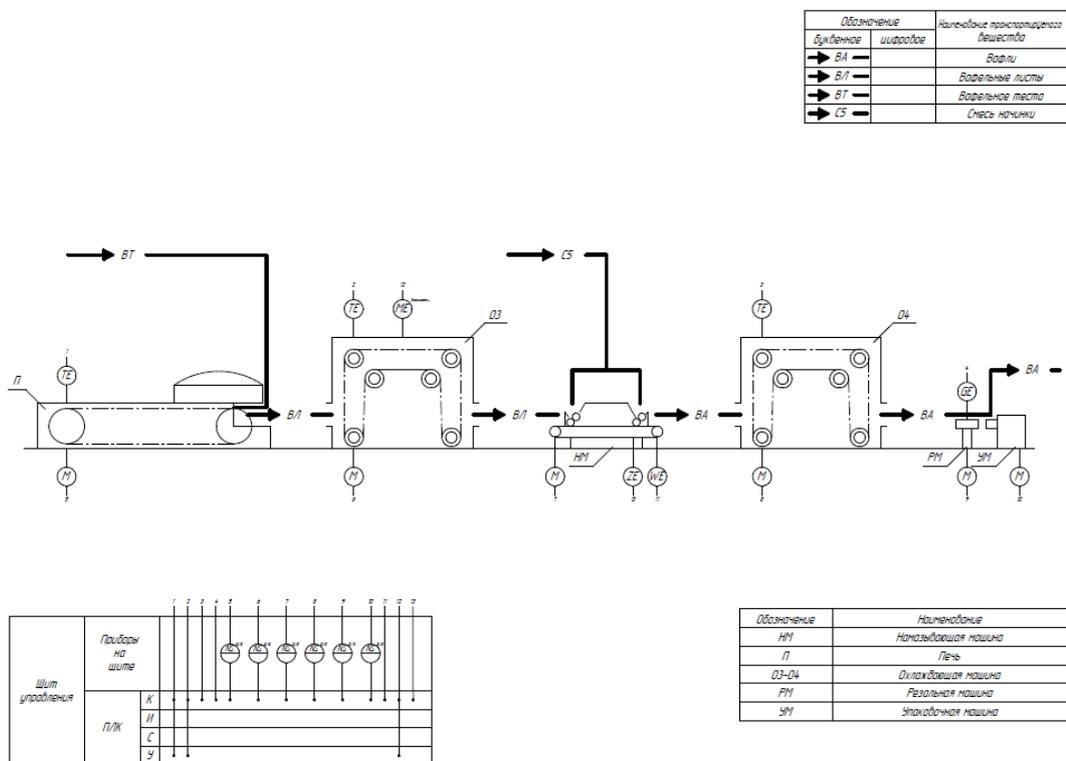


Рисунок 4 — Функциональная схема автоматизации процесса изготовления вафель. Часть 3.

1.1.6 Основные контролируемые и регулируемые параметры при изготовлении вафель

На основе описания технологического процесса выделим этапы производства вафельных изделий:

- подготовка компонентов сырья и подача их на производственные участки,
- приготовление эмульсии,
- приготовление вафельного теста,
- термообработка вафельных листов,
- приготовление жировой начинки,
- намазывание начинки на вафельные листы и сборка пластов,
- выстаивание вафельных пластов,
- резка, завёртка и упаковка готовых вафель.

Далее, перед решением комплекса задач обеспечения контроля технологического процесса производства вафель необходимо формализовано выделить основные контролируемые и регулируемые параметры на всех стадиях производства. Следуя работе [18], можно выделить такие параметры в виде точек контроля, а этап подготовки рассмотреть отдельно (см. рис. 5).

Вафельное тесто получается через смешение муки, воды и сухих сыпучих компонентов (яичного порошка, молока, фосфатидов, крахмала, соли, соды, лимонной кислоты, масла кокосового, растительного жира). Приготовление теста осуществляется в смесителе в соответствии с рецептурой, где все компоненты перемешиваются в течение 2-5 минут. Для вафельного теста установлены следующие требования: содержание влаги 58-66 %, динамическая вязкость теста 7-32 пуаз, температура — не выше 20 °С.

Начинка получается в результате обработки и смешения потоков сахара, жиров, ароматизаторов, красителей и измельчённых обрезков уже изготовленных вафель. При намазывании начинки должны выполняться следующие требования: температура 32-34 °С, содержание влаги — 0,4-2 %, содержание жира — 40-52 %, плотность — 0,8-1,1 г/см³.

После выпечки вафельных листов выполняется формирование вафельных пластов посредством установки и нанесения начинки, в результате чего формируется блок пластин из пяти вафельных листов с четырьмя слоями начинки. Готовые вафельные листы дополнительно уплотняются с помощью прижимного валика, который должен быть отрегулирован так, чтобы формируемый пласт не имел непромазанных пустот, а начинка не вытекала за его пределы. Затем вафельные блоки остужают.

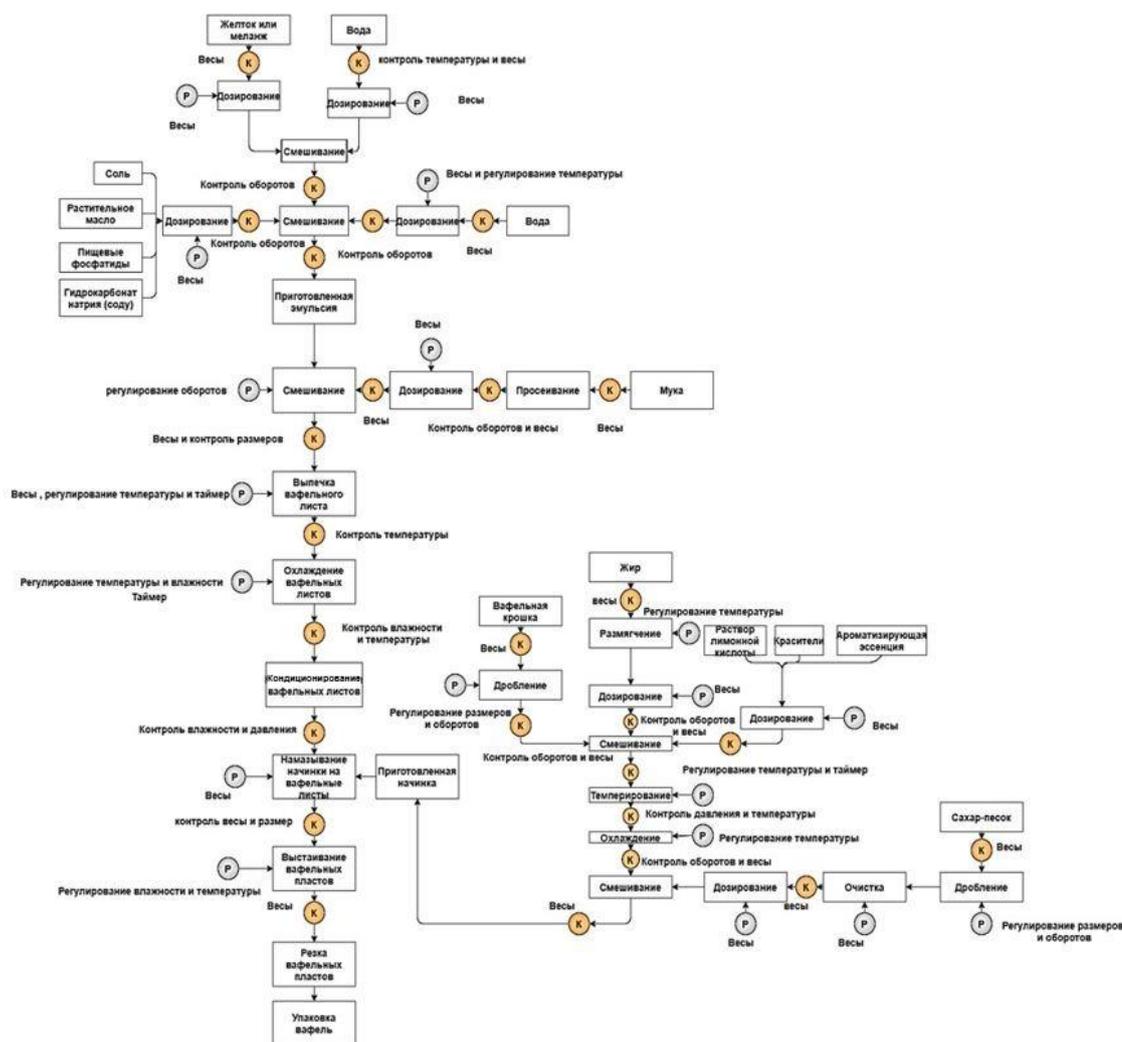


Рисунок 5 — Функционально-структурная схема технологических процессов производства вафель с указанием точек контроля и регулирования.

После остужения выполняется резка пластов на корпуса, которые затем разводятся на ряды, формируются корпуса и фасуются в упаковку на основе пластика.

Для всего технологического процесса установлены следующие нормативы по отходам: выпечка вафельных листов — 1 % (отёки), намазка и охлаждение — 3 % (крошка и деформация), резка — 4,6 % (обрезки, в том числе непромазаные края).

Изучив литературу [10, 74, 76, 101, 129] и данные реального производства ОАО «Рот Фронт» по теме параметров процесса и требований к производству вафель, рассмотрим основные из них и сформируем список технологических параметров для контроля (табл. 1). Вес компонентов в данной таблице дан исходя из рецептуры и расчёта дозировки ингредиентов на 100 г муки.

Стоит отметить, что для дальнейших этапов диссертационного исследования, на параметры введены необходимые обозначения («X1...X50»).

Так как стадии подготовки, входного и выходного контроля не относятся непосредственно к приготовлению вафель, но их параметры не менее важны, рассмотрим их отдельно (табл. 2-6). Требования по составу в основном включают содержание тех или иных компонентов в продукции и начинке, а также требования к сырью.

Таблица 1 — Основные параметры контроля и регулирования при производстве вафель.

Стадия	Процедура	Ингредиент	Параметр контроля	Обозначение	Значения	
1	2	3	4	5	6	
1. Приготовление эмульсии	1. Подготовка желтка и воды	Желток или меланж	Вес	X1	8,24 г	
			Температура	X2	22-26 °С	
		Доля		X3	5-10 %	
	2. Смешивание желтка и воды	Желток и вода	Обороты	X4	150-300 об/мин	
	3. Подготовка сырья и воды	Соль	Вес	X5	0,5 г	
			Растительное масло	Вес	X6	2,33 г
				Пищевые фосфатиды	Вес	X7
			Гидрокарбонат натрия	Вес	X8	0,5 г
			Сахар	Вес	X9	3,5 г
	3. Подготовка сырья и воды	Вода	Температура	X10	до 20 °С	
			Доля	X11	5-10 %	
	4. Смешивание	Сырье	Обороты	X12	150-300 об/мин	
			Вода	Обороты	X13	150-300 об/мин
			Смесь желтка и воды	Обороты	X14	150-300 об/мин
2. Приготовление теста	1. Просеивание муки	Мука	Вес	X15	100 г	
	2. Дозирование муки	Мука	Вес	X16	50-60 г	
	3. Смешивание с эмульсией	Мука и эмульсия	Вес	X17	60-70 г	
			Обороты	X18	270-350 об/мин	
			Окружная скорость турбины	X19	3,0-7,0 м/с	

Продолжение табл. 1.

1	2	3	4	5	6
3.Термообработка вафельных листов	1.Выпечка	Тесто	Вес	X20	65 г
			Размер листа	X21	470x350 мм
			Температура	X22	160-180 С°
			Время	X23	2-4 мин
			Зазор пластин	X24	2 мм
			Скорость запора пластин	X25	0,3 м/с
	2.Охлаждение	Вафельный лист	Температура	X26	30 С°
			Влажность	X27	1,5-3 %
			Время	X28	1-2 мин
	3.Кондиционирование	Вафельный лист	Влажность	X29	менее 4,5 %
Давление			X30	25-35 кПа	
4. Приготовление начинки	1.Обработка вафельной крошки	Вафельная крошка	Вес	X31	15 г
			Размер	X32	1-2,5 мм
			Обороты	X33	200-400 об/мин
	2.Обработка жира	Жир	Температура	X34	20-230 С°
			Вес	X35	60 г
			Обороты	X36	не менее 300 об/мин
	3.Обработка сырья	Раствор лимонной кислоты	Вес	X37	2 г
		Красители	Вес	X38	2 г
		Ароматизирующая эссенция	Вес	X39	2 г
	4.Смешивание сырья	Сырье	Обороты	X40	300-500 об/мин
	5.Смешивание	Вафельная крошка, жир, смесь сырья	Температура	X41	32-34 С°
			Время	X42	15-20 мин
	6.Темперирование	Смесь	Температура	X43	32-34 С°
			Давление	X44	2-4 кПа
	7.Охлаждение	Смесь	Температура	X45	32-34 С°
	8.Дробление сахара	Сахар-песок	Вес	X46	50 г
Размер			X47	0,2-2,5 мм	
Обороты			X48	200-400 об/мин	

Продолжение табл. 1.

1	2	3	4	5	6
4. Приготовление начинки	9.Очистка сахара	Сахар-песок	Вес	X49	6 г
	10.Смешивание сахара и смеси	Сахар-песок	Вес	X50	3-4 г
		Смесь	Вес	X51	10 г
			Обороты	X52	500-800 об/мин
	11.Финальное смешивание	Начинка	Вес	X53	12-15 г
5.Намазывание начинки на вафельные листы	-	Вафельный лист и начинка	Вес	X54	80-90 г
			Размер	X55	470x350 мм
6.Выстаивание вафельных листов	-	Вафельный лист с начинкой	Вес	X56	80-90 г
			Температура	X57	120 С°
			Влажность	X58	1-2%

Таблица 2 — Требования по содержанию ингредиентов для теста и вафельных листов.

Сырье	Содержание сухих веществ, %	На 1 т готовых листов		На 1 т готовой продукции	
		в натур. виде	в сухих веществах	в натур. виде	в сухих веществах
Мука пшеничная (в.с.)	85,5	1215,81	1039,52	361,40	223,50
Желток/Меланж	27	182,33	49,23	39,20	10,58
Соль	96,5	6,08	5,87	1,31	1,26
Сода	50	6,1	3,05	1,31	0,66
Фосфатиды пищевые	99	5,35	5,27	1,15	1,13
Итого		1415,67	1102,94	304,37	237,13
Выход	97,5	1000	975	215	209,63

Таблица 3 — Требования к начинке.

Сырье	Содержание сухих веществ, %	На 1 т фазы		На 1 т готовой продукции	
		в натур. виде	в сухих веществах	в натур. виде	в сухих веществах
Пудра рафинадная	99,85	523,79	523	411,18	410,56
Жир кондитерский	99,7	347,19	348,14	272,11	273,29
Эссенция	0	0,66	-	0,52	-
Кислота лимонная	91,2	5,24	4,78	4,11	3,75
В-каротин	2	2	-	2	-
Вафельная крошка	99,02	122,22	121,02	95,84	95
Итого	-	1001,1	996,94	785,87	782,6
Выход	99,43	1000	994,3	785	780,53

Требования к качеству определяются набором стандартов:

- ГОСТ 14031-2014 «Вафли. Общие технические условия»,
- ГОСТ 26574-2017 «Мука пшеничная хлебопекарная»,
- ГОСТ 1129-2013 «Масло подсолнечное. Технические условия»,
- ГОСТ Р 51574-2018 «Соль пищевая. Общие технические условия»,
- ГОСТ 2156-76 «Натрий двууглекислый. Технические условия»,
- ГОСТ 31895-2012 «Сахар белый. Технические условия»,
- ГОСТ 908-2004 «Кислота лимонная моногидрат пищевая. Технические условия».

Таблица 4 — Требования к полуфабрикатам.

Полуфабрикаты	Содержание сухих веществ, %	На 1 т готовой продукции	
		в натур. виде	В сухих веществах
Листы вафельные	97,5	215	209,63
Начинка жировая	96,43	785	780,53
Итого	-	1000	970,13
Выход	-	1000	970,13

Таблица 5 — Показатели качества муки.

Компоненты	Содержание
Белизна	54 у.е.
Клейковина	18 %
Зольность	0,55 %
Крупность	4,5 %
Протеин	9 %
Белки	12 %
Влага	12 %

Таблица 6 — Показатели качества сахара.

Компоненты	Содержание
Влагосодержание	0,04%
Сульфатированная зола	0,04%
Медь	1 мг/кг
Свинец	0,5 мг/кг
Мышьяк	1 мг/кг

В качестве примера рассматривалась рецептура производства вафель (табл. 7) [74], где кроме обозначенных ранее используется гидрокарбонат аммония, который используется в пищевом производстве, как разрыхлитель, а также лецитиновый порошок, представляющий собой смесь сухого молока и лецитина в соотношении 50/50 и использующийся для обеспечения однородности, цельности и плотности производимых изделий.

Таблица 7 — Пример рецептуры изготовления вафель.

Ингредиенты	Рецептура 1
Мука	100
Сахар	3,5
Масло и жир	2,7
Сухое обезжиренное молоко	3,1
Яичный порошок	0,33
Соль	0,18
Сода	0,29
Гидрокарбонат аммония	0,83
Лицетин (в жидком виде)	0,05
Вода	145

Следуя ГОСТ 14031-2014 на вафли и ранее определённым технологическим параметрам процесса производства вафель (табл. 1), можно выделить следующие основные выходные параметры этого производства (табл. 8). Выбор основных параметров выполнен исходя из соображений дальнейшего удобства использования и постановки задачи диссертационного исследования, которая будет сделана далее. Например, исключены некоторые органолептические параметры (вкус, цвет, запах, цвет начинки), содержание золы и щелочи, так как рассматриваются только первые два этапа производства.

Таблица 8 — Основные выходные параметры при производстве вафельных листов.

№ п/п	Наименование параметра	Обозначение	Допуск
1	Отделимость от пластин при выпечке	Y1	До 5 % брака
2	Цвет вафель	Y2	светло-желтого до светло-коричневого
3	Влага в вафлях после выпечки	Y3	1-2 %
4	Структура листа (консистенция)	Y4	однородная без крупинок и комочков
6	Масса	Y5	65 г.
7	Влага в вафлях после охлаждения	Y6	Массовая доля до 4 %
8	Хрусткость	Y7	хрустящий звук при разламывании

1.2 Анализ научных исследований в области производственного мониторинга

Ранее была показана важность и актуальность проблемы сбора данных на предприятиях, которая может решаться с помощью мониторинга различных процессов и объектов, с возможным применением методов и средств измерения различных производственных и экономических параметров, их

контроля, анализа, оптимизации и прогнозирования на основе применения информационных технологий [45, 78, 206, 207].

Так как работа посвящена мониторингу, как части контроля, то более глубокий обзор посвящён именно мониторингу. Для исследования научных работ в области производственного мониторинга было реализовано три подхода на основе методов классификации по трём признакам: компонентный, объектный и концептуальный.

1.2.1 Компонентный подход к анализу систем мониторинга

Мониторинг технологических процессов обычно применяется на этапе изготовления изделия [45, с. 6], однако соответствующие системы могут выполнять функции управления и анализа на основе разработанных моделей процессов и объектов. Таким образом, все системы мониторинга технологических процессов можно классифицировать по реализуемым ими функциям (рис. 6). Несмотря на то, что эти функции не относятся напрямую к процессу мониторинга, а реализуются вне его, соответствующие функции подсистемы (модули) будем называть компонентами мониторинга технологических процессов из-за их тесной связи с процессом сбора данных.

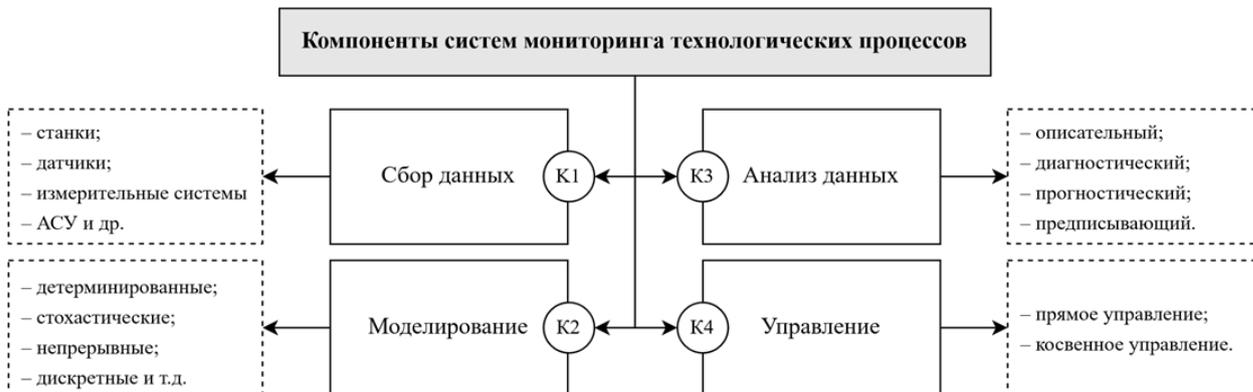


Рисунок 6 — Классификация систем мониторинга технологических процессов по их компонентам.

В диссертационном исследовании предлагается классификация, включающая четыре компонента мониторинга, которые для удобства дальнейшего проведения обзора литературы обозначены K1...K4.

Сбор данных (K1) является основным компонентом системы мониторинга технологических процессов, так как благодаря ему реализуется главная функция — сбор данных. Данные могут собираться разными способами с использованием технических средств, информационных технологий или с помощью человека. Набор собираемых данных зависит от

характера производства, уровня автоматизации и целей производителя и может включать данные из технической документации [2, с. 16, 221], систем автоматизации [78, 91], датчиков и измерительных систем [93, 182], станков с числовым программным управлением [69] и др.

Для последующего анализа полученных данных применяется компонент моделирования (К2), в котором могут использоваться различные модели: детерминированные и стохастические, непрерывные и дискретные, а также аналитические, структурные, имитационные, комбинированные, — выбранные исходя из удобства моделирования конкретного объекта, к которому этот метод применяется [45, с. 16].

После сбора данных к ним могут применяться различные виды анализа (К3), которые были показаны ранее. Также ранее было показано, что ценность этих данных возросла, а их интеллектуальная обработка будет развиваться, приводя к экономии материальных и нематериальных ресурсов и снижению риска возникновения аварий [173].

После проведения мониторинга и анализа производственных данных, становится возможной реализация функции управления (К4), которая может включать оптимизацию реализуемых процессов, выработку управляющих воздействий, поддержку принятия решений и коррекцию действующих программ управления, которые могут передаваться в объекты мониторинга и управления напрямую или косвенно через посредников.

На основе данной классификации далее приводятся примеры организации систем мониторинга технологических процессов, к которым применяется метод декомпозиции.

В основе мониторинга как процесса наблюдения за явлениями и процессами лежит отслеживание изменения параметров, к которым он применяется. В производственных условиях такими параметрами являются различные характеристики обработки изделий, временные показатели, параметры окружающей среды и энергоснабжения и т.д. Ввиду большого разнообразия отслеживаемых параметров в процессе создания систем мониторинга технологических процессов одной из первых возникающих проблем становится выбор тех параметров, которые необходимо контролировать, а также выбор наиболее значимых параметров, требующих особого контроля [41, с. 374].

Например, в статье [155] автор вводит понятие ключевых параметров, которые в наибольшей степени по сравнению с остальными влияют на качество выпускаемых изделий, но при этом, из-за тесной взаимосвязи

параметров между собой, было принято решение разделить все параметры не только на ключевые и не ключевые, а на несколько категорий в зависимости от степени их важности, а в работе [174] её авторы развили этот подход, выполнив разбиение параметров мониторинга на 18 групп.

В нескольких работах подчёркивается связь производственных параметров друг с другом, но один из наиболее проработанных практических подходов к учёту связи этих параметров показан в работе [133], где каждая система мониторинга технологических процессов состоит из концептов, учитывающих состояния, события, временные и качественные показатели, логику и особенности операторов.

В литературе также можно встретить множество различных математических методов, которые учитывают многомерность и многосвязность параметров технологических процессов. В работе [27] демонстрируется применение математического аппарата при многомерном контроле технологических процессов, а результаты работы могут быть в дальнейшем использованы для построения карты Хотеллинга.

В статье [87] рассматривается решение проблемы на основе популярного метода анализа видов и последствий отказов производственного процесса, который подразумевает деление возмущающих воздействий на факторы мгновенного, постепенного и параллельного действия, заносимые в специальную таблицу мониторинга, на основе которой составляется рациональный план управления технологических процессов. Таким образом, удаётся формализовать и описать действия дестабилизирующих факторов технологических процессов, а затем осуществлять эффективный мониторинг и управление.

Среди научных публикаций популярен байесовский метод, как один из широко применяемых для вероятностных оценок и показавший свою эффективность при распределённом мониторинге процессов [151].

В основе многих систем мониторинга технологических процессов лежат модели [46, 47], которые связаны с объектами и процессами мониторинга и позволяют повысить эффективность дальнейшего анализа данных за счёт возможности сравнения целевых показателей и реальных, а также при разработке решений, основанных на моделях, при этом, решаются задачи прогнозирования на этапе проектирования и определения оптимальных условий протекания процессов до запуска системы [67].

Опыт моделирования различных технологических процессов сформировал широкую научную базу в виде набора подходов к

моделированию [99], среди которых наиболее распространённым является использование математических моделей, позволяющих получать численные данные, которые напрямую могут быть использованы для проведения анализа. Например, часто используются методы векторного анализа [53], графо-аналитические способы представления информации [6, 72, 103, 107, 139], структурно-логические [120], описания в форме фазовых пространств [66], идентификация статических моделей [50, 62], нейросетевые модели [80], диагностика нарушений на основе фильтров Калмана [30], а для отображения динамики изменения параметров технологических процессов применяют карты Шухарта и Хотеллинга и сети Петри, как одни из основных математических аппаратов моделирования динамических дискретных систем [52, 107].

С развитием информационных технологий и становлением концепции умного производства в производственных системах практикуется применение цифровых двойников, в основе которых лежат модели процессов и объектов [139]. Например, в работе [203] используется цифровой двойник гидравлической опоры шахтного оборудования, который является виртуальным представлением физического объекта и включает различные его параметры с целью реализации интеллектуальной функции управления.

Совместно с появлением новых технологий, совершенствуются известные методы мониторинга технологических процессов. Так, в статье [124] предлагается адаптивная контрольная диаграмма Шухарта, реализующая стратегию с переменным размером выборки, позволяющая отслеживать коэффициент вариации в производственных условиях.

Как уже было показано ранее, следующим этапом после мониторинга технологических процессов, является анализ полученных данных, который может осуществляться внутри разрабатываемой системы мониторинга технологических процессов для обеспечения эффективности системы и производства, в котором она развёрнута [217].

В системах мониторинга технологических процессов популярен анализ отклонений и нарушений, который включается в моделирование с помощью контрольных карт, способных формироваться в режиме реального времени [190].

Другим популярным подходом к анализу производственных процессов и систем является предиктивный анализ. В патенте [218] описывается система мониторинга производственных целей на основе использования результатов предиктивного анализа, где возможно получение данных от различных

производственных систем и сравнение текущих данных с полученными ранее в режиме реального времени.

Совместно с развитием техники усложняется мониторинг технологических процессов, обостряется проблема обеспечения коммуникации и обмена данными в режиме реального времени. Эта проблема обозначена в работах [134, 185, 216], где в результате эмпирического моделирования определена обратная связь гибкости и производительности производственных систем.

На основе результатов анализа может формироваться управляющее воздействие с целью оптимизации и коррекции процессов и объектов мониторинга. Такие рекомендации, команды и управляющие директивы могут формироваться внутри системы мониторинга технологических процессов и передаваться напрямую или косвенно в системы управления роботами, в контроллеры и системы числового программного управления.

В производственных системах уже реализован ряд функций сбора и анализа параметров обработки изделий, а основная система мониторинга в этом случае может извлекать только необходимые данные и рекомендации по управлению [69], поэтому в таких случаях разработчикам уже не требуется внедрять дополнительные измерительные системы [93].

Например, в статье [122] описывается система мониторинга технологического процесса резания и состояния оборудования, которое его осуществляет, а подсистема коррекции на основе динамики изменения выходных параметров технологической системы создаёт управляющее воздействие, благодаря которому формируется оценка необходимости её проведения, а в работе [211] аналогичная задача решается с помощью искусственного интеллекта.

Система мониторинга технологического процесса может включать интерфейс оператора, например, как в работе [49], который позволяет отображать информацию о протекающих технологических процессах, ошибках, предупреждениях на различных этапах контроля технологических процессов, генерировать рекомендации по управлению.

Авторы статьи [148] используют результаты оценки данных виртуальной обработки, сигналов датчиков и параметров детали, получаемых в реальном времени. В результате образуются три разных интегрированных домена концентрации информации об операции, пути перемещения инструмента и времени обработки. Реализуемая интеллектуальная система мониторинга

может определять, в какой момент инструмент может прийти в негодность, что позволяет избегать подобных нештатных ситуаций.

В работе С.А. Игнатьева и других авторов [45] описывается система, в которой присутствуют все элементы предложенной классификации. Сбор определённого авторами набора данных осуществляется с помощью информационно-коммуникационных интерфейсов, контрольно-измерительных приборов и измерительных машин. На основе применения математических моделей, предложенных авторами, и обновляемой базы знаний формируется управляющее воздействие для автоматизированной подналадки оборудования с целью оптимизации режимов резания, повышения производительности оборудования и качества обрабатываемых изделий.

Таким образом, можно утверждать, что система мониторинга технологического процесса может выполнять функции, не только относящиеся к мониторингу, но и реализовывать различные методы моделирования, анализа и управления объектами и процессами мониторинга. Благодаря развитию науки и техники в современных системах мониторинга технологических процессов применяются информационные технологии, позволяющие повышать эффективность производств и качество их управления.

1.2.2 Классификация объектов мониторинга

Проводя анализ публикаций, можно отметить, что системы мониторинга разрабатываются для разных объектов, поэтому в качестве другого подхода к анализу научных исследований в данной работе рассматривается классификация систем мониторинга технологических процессов по объекту применения.

Следуя работам В.В. Тихомирова [107] и С.А. Игнатьева [45] и рассматривая различные решения в области сбора данных, можно выделить следующие категории систем мониторинга.

1. Системы мониторинга качества на основе конечных показателей готового продукта.
2. Системы мониторинга технологических процессов на основе показателей реализации этих технологических процессов (мониторинг маршрута, параметров операций, режимов резания и др.).
3. Системы мониторинга технологических процессов, контролирующих состояние применяемых устройств, инструментов,

оборудования, машин, а также характеристики операторов станков и других ресурсов.

4. Системы мониторинга этапов жизненного цикла продукта и параметров, не относящихся к технологическому процессу.

Первую категорию систем мониторинга можно отнести к оценке качества продукта технологических процессов, так как она косвенно характеризует его соответствие требованиям технолога, а вторая категория характеризует технологический процесс напрямую. Третья категория систем мониторинга качественных показателей изделий связана с конечным результатом выполнения технологических процессов, и в этом случае данные являются статичными для каждого изделия и не относятся к технологическим процессам напрямую. Четвёртая категория слабо связана с технологическими процессами, но, как было показано ранее, она может быть включена в систему мониторинга технологических процессов и является важной частью обеспечения эффективности функционирования предприятия, поэтому, чтобы обозначить её связь с технологическим процессом, отнесём её к ресурсному мониторингу.

На основе данных рассуждений предлагается следующая классификация систем мониторинга технологических процессов (рис. 7), в которой все системы классифицированы по объекту мониторинга: организационные, операционные, качественные и ресурсные.



Рисунок 7 — Классификация мониторинга технологических процессов по объекту применения.

Под организационным (O1) мониторингом будем понимать мониторинг маршрута производства изделий, очерёдности выполнения операций и временные затраты, которые необходимы на выполнение каждой операции. Объектом операционного (O2) мониторинга являются параметры технологического процесса: режимы резания, шлифования [158, 159], скорость вращения шпинделя, температура при нагревании в печи и др. Выбор

параметров может строиться на основе документации к технологическим процессам [230]. Качественный (О3) мониторинг основывается на параметрах готовых изделий, изменяющихся от изделия к изделию [66, 87]. В ресурсный мониторинг (О4) включаются различные объекты: человеческие ресурсы, инфраструктура [219], машины и инструменты [95], информационное обеспечение и др.

Разрабатываемые системы мониторинга могут относиться как к одной, так и к нескольким группам. Например, параметры мониторинга могут определяться не только в процессе протекания технологических процессов, но и после него. В этом случае должна возникать обратная связь в системе управления качеством продукции. Так как показатели готовых изделий постоянно изменяются, то следует корректировать управляющее воздействие на параметры технологических процессов, которое формируется на основе мониторинга [35]. Далее рассматриваются примеры публикаций, подвергнутые предложенной выше классификации.

В работе С.А. Игнатьева и других авторов [45] описывается процесс сбора данных о технологических процессах. Эти данные включают информацию о техническом состоянии оборудования, параметры режимов обработки и параметры заготовок и деталей. На основе этих данных осуществляется сопоставительный анализ результатов, диагностирование, выявление тенденции изменения определяющих параметров и прогнозирование, а затем формируется решение о профилактических, корректирующих и защитных действиях, которые будут реализованы для соответствия заданному качеству обработки деталей.

В статье [170] описывается система мониторинга технологических процессов, которая реализована в виде экспертной системы, где выполняется сравнение текущих параметров технологических процессов и идеальных с применением популярной математической модели метода главных компонент К. Пирсона.

В литературе также описаны разработки в области интеллектуального обеспечения безотказной работы инструмента. Одна из разработок [100] представляет собой программный продукт, обеспечивающий снижение затрат на инструментообеспечение посредством анализа данных о вероятности безотказной работы комплекта инструментов, их количестве и скорости резания.

В качестве обособленной группы систем мониторинга можно выделить системы мониторинга технологического оборудования, например,

гидравлических опор [203] и удалённый мониторинг оборудования [149, 179] и др.

В научных публикациях также описаны системы мониторинга жизненного цикла продукта [209], уровневой структуры предприятия [183], цепочки поставок [169], персонала и охраны труда [155], управления рисками [200], распределения ресурсов [96], безопасности [225], эффективности предприятия [125], реализации исполнительных функций [111] и других объектов.

Кроме систем, нацеленных на интеграцию различных технологических подсистем в единую среду мониторинга, в литературе можно найти публикации, где описываются узкоспециализированные системы мониторинга потенциально опасных производств [190], сложных производств [138], многомодовых процессов [185], процессов резания [195], качества абразивной обработки [165], поиска механических дефектов [143], небольших технологических процессов [123], отдельные локальные киберфизические системы [197], системы мониторинга на базе промышленных логических контроллеров [153] и другие.

Второй подход классификации систем мониторинга технологических процессов опирался на их специализацию по объектам применения. Очевидно, что в условиях цифровизации и внедрения концепции умного производства существует потребность в разработке унифицированной структуры системы мониторинга и алгоритмов, основанных на моделировании, для проектирования оптимизированной компоновки завода и производственного процесса с применением систем мониторинга технологических процессов [213].

Результаты классификации на основе компонентного и целевого подходов систематизируют результаты обзора систем мониторинга, представленных в рассмотренных в настоящей работе источниках (табл. 9).

Для удобства построения таблицы были введены сокращения на основе реализованных подходов (рис. 6, рис. 7) для компонентов (К1...К4) и объектов (О1...О4) систем мониторинга.

Результаты обзора статей по этим двум подходам подтверждают сделанные ранее выводы о необходимости проведения исследований и разработок в области современных систем мониторинга, которые бы были включены в единую систему.

Таблица 9 — Анализ публикаций по компонентам и объектам применения мониторинга.

Публикации	Компоненты				Объекты			
	К1	К2	К3	К4	О1	О2	О3	О4
Антамошкина Е.А. [6]	+	+	+		+			+
Васильков А.В. [28]	+	+	+			+	+	
Игнатъев С.А. и др. [45]	+	+	+	+		+	+	+
Калякулин С.Ю. и др. [46, 47]	+	+	+			+	+	+
Касимов С.А. и др. [49]	+	+	+	+		+	+	+
Клячкин В.Н. и др. [53]	+	+	+		+	+	+	
Локтев И.И. и др. [66]	+	+	+				+	
Розно М.И. [87]		+	+		+	+	+	
Самойлова Е.М. [92]	+	+	+	+	+	+	+	+
Соломенцев Ю.М. и др. [100]	+		+					+
Тихомиров В.В. [107]	+	+	+			+		+
Шмелев В.В. [120]	+	+	+		+	+		+
Ягъев Э.Э. [122]	+		+			+	+	
Balaji V. и др. [125]	+		+		+	+		+
Byrne G. и др. [131]	+	+	+	+		+		+
Sao W. и др. [133]	+	+	+		+	+	+	+
Caprihan R. и др. [134]	+		+		+			+
Dudek-burlikowska M. [139]	+	+	+	+	+	+	+	+
de-Feilipe D. и др. [138]	+	+	+			+		
Frotoni E. и др. [141]	+	+	+		+	+		+
Gerbach R. и др. [143]	+		+				+	
Heo E. и др. [148]	+	+	+			+		+
Jiang Q. и др. [151]	+		+			+		
Karkoszka T. [155]	+			+		+		+
Keshari A. [161]	+	+	+	+		+		+
Li D. и др. [169]	+		+		+			+
Li X.H. и др. [170]	+	+	+	+		+		
Morgan J. и др. [178]	+	+	+	+		+		+
Mori M и др. [179]	+		+	+		+		+
Mueller E. и др. [180]	+		+		+			+
O'Donovan P. и др. [182]	+	+	+		+			+
Pirtiojja T. [187]	+	+	+	+	+	+		+
Racoix-Lemoine M.P. и др. [183]	+		+	+	+	+		+
Peng K. и др. [185]	+		+			+		
Podovano A. и др. [184]	+	+	+	+	+	+		+
Rusinov L.A. и др. [190]	+	+	+			+	+	
Stump B. и др. [194]	+	+	+	+	+	+	+	+
Tarallo A. и др. [197]	+		+			+		
Tupa J. и др. [200]	+		+		+	+	+	+
Wang S. и др. [201]	+	+	+		+	+	+	+
Weinberger N. и др. [202]	+		+			+	+	+
Xie J. и др. [203]	+	+	+	+		+		+
Zhang R. и др. [212]	+		+		+	+	+	+
Zhang Z. и др. [209]	+	+	+	+	+	+	+	+
Zhong R.Y. и др. [214]	+	+	+	+		+		+
Zhuang C. и др. [216]	+		+	+	+			+

Сделав вывод о возможном отсутствии единого метода или стандарта интеграции производственных систем, далее можно подтвердить его, проведя анализ систем мониторинга согласно принципам их построения.

1.2.3 Современные системы мониторинга технологических процессов и концепция умного производства

Современные системы мониторинга технологических процессов, являющиеся сложными комплексными интегрированными системами, создаваемыми в рамках концепции умного производства, должны строиться по принципам этой концепции [1, 61]. В предлагаемой далее классификации рассматриваются следующие принципы построения систем мониторинга технологических процессов (рис. 8).



Рисунок 8 — Классификация мониторинга технологических процессов по принципам их реализации.

Модульный принцип (П1) проектирования производственных систем, характеризует их архитектуру как модульную, которые способны функционировать изолировано друг от друга и реконфигурироваться. Такие модульные системы должны быть гибкими как по структуре, так и в отношении своих компонентов [50, 182].

Принцип виртуализации (П2) достигается за счёт автономного функционирования компонентов системы, которые могут быть не связаны с технологическим процессом.

Сервисная ориентированность (П3) базируется на идее поддержания информационного обеспечения и сопровождения продукта на всех этапах его жизненного цикла.

Принцип совместимости (П4) обеспечивается возможностью беспрепятственной организации информационного обмена между компонентами системы.

Децентрализация (П5) определяется архитектурой системы мониторинга технологического процесса, которая не имеет единого вычислительного и обрабатывающего центра.

Функционирование в режиме реального времени (П6) заключается в способности системы своевременно реагировать на внутренние и внешние изменения.

Все перечисленные выше принципы создания умных современных информационно-технических систем основываются на применении информационных технологий [63].

Особенно выделяется применение технологий искусственного интеллекта на производстве. Например, изучая современные публикации, можно выделить тенденцию к использованию интеллектуальных инструментов и датчиков, способных проводить первичную обработку поступающей информации [131]. Кроме этого, технологии искусственного интеллекта применяются для управления производством, как это показано в работе [216], где рассматривается система спутниковой транспортировки и сборки.

Научный интерес представляет применение технологии искусственного интеллекта для систем мониторинга технологических процессов. В литературе можно найти различные системы мониторинга, использующие эту технологию [214], а также узкоспециализированные системы [170].

В работе [214] показано применение технологии Интернета вещей для мониторинга состояния систем в режиме реального времени с применением концепции облачного производства. Показано, что, используя технологию Интернета вещей, можно получить различные производственные показатели, отследить потоки ресурсов и состояние объектов, обеспечить оперативный информационный обмен между всеми участниками процесса на разных уровнях.

Несмотря на влияние информационных технологий на производственную сферу, в ней сохраняются принципы иерархичности по аналогии с уровнями автоматизации производств, однако модульный принцип организации уже давно активно внедряется на всех уровнях. Например, одним из решений [122] для повышения качества контроля является применение корректирующей подсистемы, которая включает в себя несколько модулей: обнаружения

отклонений, выявления их причин, интеллектуальный модуль принятия решений и выбора вида коррекции, модуль коррекции модели технологического процесса и модуль восстановления подсистем.

Все модули информационных систем связаны, а тенденция к децентрализации способствует формированию единого информационного пространства [40, с. 41, 92]. В статье [70] автор утверждает, что модель современного интеллектуального машиностроительного производства строится на базе концепции единого информационного пространства предприятия, которая включает в себя модели данных, взаимосвязи объектов, поведения и функционирования. Также существуют современные рекомендации создавать системы с модульной организацией, которые обладают способностью к открытой интеграции с другими системами [69, 173].

Таким образом обеспечивается интеграция всех уровней автоматизации и систем [99, с. 7, 180]. Эта интеграция создаёт возможности для сервисного и информационного сопровождения на всех этапах жизненного цикла продукта [98], что является важным в условиях жёсткой конкуренции и рыночных отношений [189]. В этом аспекте работа М. Dudek-burlikowska [139] вызывает большой научный интерес в связи с предлагаемыми подходами, заключающимися в охвате всех стадий жизненного цикла продукта. Автор включает в набор параметров для мониторинга не только относящиеся к этапу производства, но и данные о клиенте, подготовке производства, охране труда и других. Все параметры, подвергаемые мониторингу, объединяются в логические группы, что позволяет сформировать индекс, характеризующий качество протекания технологических процессов.

Поддержка жизненного цикла позволяет улучшать сервисные услуги вне производства, например, после продажи изделий, поэтому принцип сервисной ориентированности является значимым для обеспечения эффективности деятельности предприятия.

В работах [152, 194] сервисная ориентированность производства тесно связана с кастомизацией. Представленная организация производства позволяет предлагать на основе технологии Интернета вещей дополнительные сервисы для рабочих в цехе и для клиентов предприятия.

Ввиду большого разнообразия методов и технологий наиболее перспективными становятся комбинированные производственные системы, объединяющие в себе несколько технологий, как, например, это показано в статье [203], где на основе технологий цифровых двойников, Интернета вещей

и системы виртуального удалённого мониторинга построена соответствующая система для шахтного оборудования.

В то же самое время набор доступных современных технологий обостряет проблему интеграции разных систем, поэтому возникает необходимость использовать общие стандарты и протоколы для облегчения коммуникации производственных систем. В работах [131, 214] предлагается использование стандарта MTConnect для организации информационного взаимодействия станков, сенсоров и другого промышленного оборудования, а также для организации связи с системой мониторинга технологических процессов, а в статье [184] автор демонстрирует полную интеграцию систем и устройств предприятия, тем самым максимально приблизившись к идее организации единого информационного пространства.

Рост производственных информационных систем способствует росту рисков обеспечения их безопасности и конфиденциальности данных, которые они обрабатывают. Проблема кибербезопасности является достаточно сложной для решения из-за высокой степени использования информационных технологий на машиностроительных производствах [131]. Комплексный подход к проблеме и соответствие процессов международным сертификации (например, ISO 9001) может обеспечить необходимый уровень безопасности при сохранении высокого уровня цифровизации процессов [200].

Сегодня на рынке уже можно найти коммерческие предложения по мониторингу технологических процессов, однако они отличаются дороговизной и узкоспециализированностью [226], что делает их использование проблематичным для многорецептурных и мелкосерийных многономенклатурных производств.

Большое количество научных работ не могут быть подвергнуты предлагаемому методу классификации ввиду их незавершённости [155] или теоретизированности применяемых методов [6, 50, 62, 66, 72, 87].

Далее табл. 10 демонстрирует подробный анализ систем мониторинга технологических процессов, согласно классификации по принципам организации системы.

Анализ публикаций по третьему подходу показал, что не все системы контроля строятся согласно принципам концепции умного производства (рис. 9). Это можно объяснить тем, что некоторые авторы создавали узкоспециализированные системы, которые не функционируют в принципе или могут быть неэффективными в условиях умного многорецептурного пищевого или машиностроительного мелкосерийного многономенклатурного

производства. Также можно отследить закономерность, согласно которой, чем больше оборудования охвачено системой контроля технологических процессов, тем больше принципов концепции умного производства она поддерживает.

Таблица 10 — Анализ публикаций по мониторингу технологических процессов по принципам организации системы.

Публикации	П1	П2	П3	П4	П5	П6
Игнатъев С.А. и др. [45]	+			+		+
Калякулин С.Ю. и др. [46, 47]	+				+	+
Касимов С.А. и др. [49]	+					+
Клячкин В.Н. и др. [53]	+	+		+		
Самойлова Е.М. [92]	+	+			+	+
Соломенцев Ю.М. и др. [100]	+					
Тихомиров В.В. [107]	+	+			+	+
Ягъев Э.Э. [122]	+				+	+
Balaji V. и др. [125]	+	+	+	+	+	+
Bugne G. и др. [131]	+	+		+	+	+
Сао W. и др. [133]		+	+		+	+
Caprihan R. и др. [134]						+
Dudek-burlikowska M. [139]	+	+	+	+	+	+
de-Feilipe D. и др. [138]	+			+		+
Frotoni E. и др. [141]	+	+	+	+	+	+
Li D. и др. [169]	+		+	+	+	+
Li X.H. и др. [170]	+	+	+	+	+	+
Mori M и др. [179]	+	+	+	+	+	+
Morgan J. и др. [178]	+	+			+	+
Mueller E.И др. [180]	+	+		+	+	+
O'Donovan P. и др. [182]	+			+	+	+
Racoix-Lemoine M.P. и др. [183]	+		+	+	+	+
Peng K. и др. [185]				+		+
Podovano A. и др. [184]	+	+	+	+	+	+
Rusinov L.A. и др. [190]				+		+
Stump B. и др. [194]	+	+	+	+	+	+
Tupa J. и др. [200]	+	+	+	+	+	+
Tarallo A. и др. [197]					+	+
Wang S. и др. [201]	+	+	+	+	+	+
Weinberger N. и др. [202]	+	+	+	+	+	+
Xie J. и др. [203]	+	+		+	+	+
Zhang Z. и др. [209]	+	+				+
Zhong R.Y. и др. [214]	+	+	+	+	+	+
Zhuang C. и др. [216]	+		+	+	+	+

Подводя итог проведения анализа научных исследований, можно утверждать, что в литературе существует большое количество публикаций по теме мониторинга технологических процессов. Авторы из разных стран мира показали свои разработки в области такого мониторинга в патентах [217–220],

диссертациях [28, 30, 44, 107] и статьях. Таким образом, тему мониторинга технологических процессов можно считать в большей степени проработанной как с практической, так и теоретической стороны, но можно отметить недостаток исследований в области цифрового мониторинга многоцептурных (многономенклатурных) производств вафель.

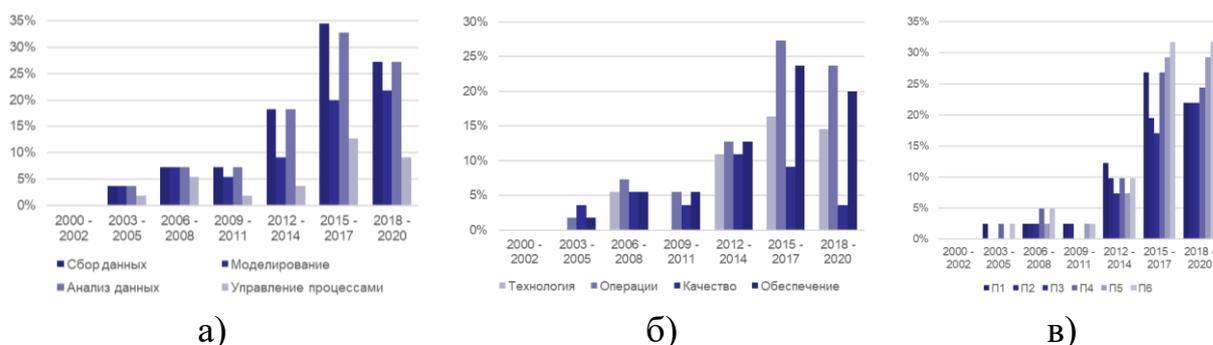


Рисунок 9 — Статистические результаты классификационных подходов: объектный (а), компонентный (б) и концептуальный (в)

1.3 Определение мониторинга технологического процесса

Так как в данной работе рассматривается мониторинг, как часть контроля, то следует рассмотреть этот термин подробнее, хотя во многих источниках эти термины всё равно рассматриваются как синонимы и нет чёткого определения, чем они отличаются. Мониторинг технологических процессов является неотъемлемой частью многих производственных систем, а в качестве объекта мониторинга могут выступать не только сами технологические процессы, но и жизненный цикл изделия, операции, оборудование и другие объекты, которые тоже оказывают влияние на технологические процессы и связаны с ним.

В литературе можно встретить несколько определений мониторинга технологических процессов. Например, в статье В.А. Холопова и других авторов [163] под таким мониторингом понимается идентификация отклонений параметров объекта мониторинга от штатного режима функционирования, либо выявление тенденции изменения характеристик на основе систематического сбора и анализа информации об объекте.

Игнатъев С.А. совместно с коллегами в своей монографии проводит анализ разных определений производственного мониторинга [45, с. 6] и даёт своё определение, называя мониторинг переходом от контроля качества готовой продукции и выявления брака к контролю соблюдения необходимых условий изготовления продукции, условий, реально определяющих уровни качества и затрат на производство [45, с. 34]. Авторы этой монографии

обратили внимание на близость положений, обозначенных в их работе, к определению мониторинга, данного А.В. Пушем [85], который утверждал, что мониторинг технологических процессов включает в себя диагностику, идентификацию, прогнозирование и управление состоянием станочной системы на основе анализа информации и принятия решения.

С.И. Клепиков в своей статье [51] показал, как в процесс производственного мониторинга включаются процессы наблюдения, анализа, оценки качества, надёжности и безопасности эксплуатации оборудования.

Таким образом, с учётом результатов проведённого обзора литературы, можно утверждать, что в процесс мониторинга технологических процессов входит не только сбор данных, но и их анализ для решения управленческих задач, которые могут заключаться в прямом и косвенном управлении оборудованием и процессами, оптимизации технологических процессов, выработке аналитических отчётов и пр., т.е. современные системы мониторинга решают задачи контроля и диагностики. Также можно говорить, что мониторинг технологических процессов может быть направлен на разные объекты производственного процесса: сам технологический процесс, его организационные показатели, качество продукта и ресурсное обеспечение технологических процессов. При этом, как показал обзор литературы по данной тематике, не все цели и объекты достигаются и реализуются разработчиками в системах мониторинга технологических процессов. Например, система мониторинга технологических процессов может осуществлять только сбор данных и не осуществлять их обработку, а анализ и принятие решений могут быть переданы другим системам или человеку. Однако проведение мониторинга технологических процессов бывает необходимо для решения какой-либо конкретной задачи, например, для сбора данных с целью их последующего использования. В подобных случаях мониторинг позволяет реализовать управленческие решения и оптимизировать объект мониторинга на основе анализа данных.

Ввиду того, что объектом исследования данной работы является мониторинг технологических процессов, а его определяют не только параметры выполнения операций обработки, но и его ресурсное обеспечение, под мониторингом технологического процесса будем понимать процесс сбора данных о технологическом процессе и его ресурсном обеспечении для последующего анализа и реализации эффективных стратегий управления технологическим процессом.

На основе данного определения, можно выделить задачи мониторинга технологических процессов [230]:

- определение набора собираемых данных;
- сбор данных о технологических процессах и его ресурсном обеспечении;
- анализ собранных данных с целью выявления отклонений в реализации технологических процессов;
- реализация человеко-машинного интерфейса, обеспечивающего предоставление оператору полученной информации после её сбора и анализа для реализации управленческих решений;
- реализация выработанных управляющих воздействий.

1.4 Цифровой двойник в производственных системах

1.4.1 Применение цифрового двойника при построении современных цифровых производств

Решение задачи анализа производственных данных, собираемых при контроле технологических процессов в условиях отсутствия возможности быстрого сопоставления требуемых и реальных значений параметров технологических процессов, становится затруднительным из-за возникающих подзадач поиска данных в технологической документации, определения необходимого соответствия квалификации работников, идентификации технологических процессов и др. При контроле технологических процессов в условиях многорецептурных (многономенклатурных) производств обозначенные задачи кратно усложняются и растут в количественном отношении.

Для упрощения процесса сопоставления требуемых и реальных характеристик технологических процессов используются различные методы их моделирования [163]. Одним из способов хранения информации является цифровой двойник, который в условиях умного современного производства часто находит широкое применение при моделировании изделий, оборудования и процессов [172].

Современная тенденция цифровизации [29] различных процессов на предприятиях активно стимулирует развитие концепции «цифрового двойника», которая является перспективным направлением развития техники и цифровых предприятий. Такие производства предполагают максимальную автоматизацию обработки изделий и бизнес-процессов в виртуальном пространстве. Отображение производственных процессов и всего

предприятия в виртуальном пространстве является одним из способов их моделирования для решения задач оптимизации и управления технологическими процессами. На основе такой виртуализации задача контроля технологических процессов может быть решена с помощью технологии цифровых двойников [83, 105], как одного из инструментов моделирования.

Существует большое количество статей, в которых демонстрируются возможности применения концепции цифровых двойников для решения реальных производственных задач. При изучении различных научных публикаций можно сделать вывод, что каждый разработчик использует то определение, свойства и функционал двойника, которые подходят для решения его собственной научной задачи. По этой причине, можно отметить [140], что в литературе не сформировано единой концепции применения технологии цифровых двойников, а приводятся только различные её варианты трактования в соответствии с решаемыми в исследованиях задачами.

Под «цифровым двойником» подразумевается [210] один из подходов к созданию устойчивой связи физического и цифрового мира. Объектами, к которым может применяться данный подход, могут служить следующие объекты:

- изделия, детали, готовая продукция,
- технологический процесс [192],
- цифровое предприятие [177].

В результате использования технологии цифровых двойников у разработчиков появляются новые возможности моделирования, тестирования и оптимизации, которые позволяют улучшить качественные характеристики объекта исследования. Данные преимущества проявляются при создании двойника любого объекта из перечисленных выше.

В научных публикациях можно увидеть различные определения цифрового двойника, которые характеризуют его с разных сторон. При самом общем подходе [135] такой двойник является концепцией или концептуальной идеей, которая объединяет основные подходы к его созданию, формированию цифровой копии объектов или процессов реального мира.

В большинстве рассмотренных публикаций под цифровым двойником понимается программный продукт или информационно-техническая система, которая является аналогом или виртуальным образом физического объекта. В таком контексте разными авторами [26, 102, 140] используется подход к

определению цифровых двойников, где такой двойник применяется, как инструмент моделирования внутренних процессов, технических характеристик с учётом воздействий факторов внешней среды. Развивая этот подход, другие авторы [16] называют цифровым двойником цифровую копию рабочего производственного процесса или объекта, которая существует на протяжении всего жизненного цикла объекта в едином информационном пространстве. В некоторых случаях под цифровым двойником понимают [167] цифровое представление физического или разрабатываемого объекта, а в других случаях [1] цифровой двойник является реализацией двусторонней связи между иерархической моделью и производственными системами.

Кроме основных названных выше идей, были предложены другие концептуальные идеи для определения цифрового двойника. Например, в одной из работ говорится [37], что цифровой двойник — это компьютерное трёхмерное представление объекта, которое является точной копией физического прообраза, копируя все его параметры и характеристики, включая условия эксплуатации готовых изделий. В других публикациях [140, 210] выделяется ещё одна из целей создания двойника — обеспечение предиктивных возможностей для моделирования поведения продукта в процессе производства и эксплуатации.

Большое разнообразие цифровых двойников создало предпосылки для создания их классификаций на основе различных критериев. Например, в одной из работ [26], вводится классификация, которая разделяет все цифровые двойники на три класса по способу взаимодействия с объектом:

- 1) прототипы,
- 2) экземпляры,
- 3) агрегированные двойники.

Под прототипами авторами понимаются такие цифровые двойники, которые обрабатывают только статическую информацию объекта, загруженную на этапе его разработки. Экземпляры и агрегированные двойники оперируют динамическими данными, которые обеспечивают информационную связь либо только с одним объектом, либо с группой аналогичных объектов соответственно.

Авторы другой работы [136] рассматривают исторический контекст возникновения различных видов двойников и предлагают разделять их на:

- 1) цифровые,
- 2) виртуальные,
- 3) гибридные.

Первый класс двойников создаётся на этапе разработки объекта и не изменяется во времени. Второй класс применяется в режиме реального времени, собирая информацию о протекающих процессах и операциях. В качестве третьего предлагается новый вид двойников, который объединяет свойства первых двух типов и основывается на физических моделях, модулях обратной связи и интерпретации информации.

1.4.2 Преимущества применения технологии цифровых двойников

Изучая научный опыт применения концепции цифровых двойников [135], можно заметить, что в результате процесса разработки производственных систем создаётся единая информационная среда, которая объединяет взаимосвязанные элементы, виртуальные модули, данные и сервисы. Показано [16, 210], что такая среда позволяет повысить эффективность управления и мониторинга объектов, а также обеспечить их качественное послепродажное обслуживание и повысить срок эксплуатации.

Авторы одной из работ [208], разрабатывая модель процесса производства деталей на предприятии, предлагают использовать цифровой двойник, который содержит набор параметров объекта, собранный на разных этапах производственного процесса, включая контроль качества готовой продукции. В работе [56] рассматривается концепция применения цифровых двойников промышленных объектов для эффективного управления проектами их создания и эксплуатации. Также в этой работе подтверждается целесообразность создания такого двойника, потому что благодаря ему обеспечивается формирование необходимой для выработки оптимизационных и управленческих решений структуры данных, состоящей из цифровых моделей объектов, спецификаций компонентов, руководства, данных по обслуживанию и информации о поведении применяемых производственных систем в различных условиях.

Множество функций и целей создания цифрового двойника позволило ему приобрести свойства масштабируемой технической системы, которая может охватывать разное количество производственных уровней. В научных работах предлагаются разные по структуре и масштабам системы, которые включают индивидуальный набор охватываемых уровней предприятия. Например, в одной из работ [168], предлагается система управления умным производством на основе его двойника. Помимо разработчика в структуру этого цифрового двойника включается потребитель и отдел сервисного обслуживания, а в другом варианте аналогичной системы [145] предлагается

система, объединяющая также акционеров и поставщиков материалов с целью ресурсного обеспечения и организации производства.

По причине большого разнообразия вариантов создания цифровых двойников может использоваться [37] модульная архитектура системы информационного обмена. Каждый из модулей, взаимодействуя с применяемыми ERP, SCADA, MES, PLC и полевыми системами и устройствами, принадлежит одному из следующих уровней:

- киберфизический уровень [168, 181],
- уровень первичной обработки и хранения данных,
- распределённый уровень вычислений и хранения данных,
- уровень моделей и алгоритмов,
- уровень визуализации и интерфейсов пользователей.

Авторы научной работы [136] рассмотрели временной аспект существования цифровых двойников. Они показали, что наиболее эффективным решением является создание таких моделей, которые способны работать в автономном режиме, начиная с этапа проектирования на протяжении всего жизненного цикла объекта моделирования. В данной работе авторы говорят об эффективности применения концепции цифровых двойников технологических процессов при проектировании процесса создания нового изделия.

После изучения вопросов организации, архитектуры, масштабируемости и времени существования цифровых двойников можно утверждать, что цифровой двойник является гибким решением по автоматизации и цифровизации производства. Такая гибкость позволяет разработчикам составлять собственные наборы параметров цифровых двойников, учитывая важность этих параметров при решении поставленных задач, а также в целом определять набор свойств и возможностей, которыми создаваемые двойники будут обладать.

Авторами исследования [140] представлен обзор характеристик цифровых двойников. В этом исследовании был продемонстрирован ранжированный список свойств таких двойников с учётом частоты их применения. Также было отмечено, что вопрос о наборе характеристик, которыми должен обладать цифровой двойник для широкого использования в промышленности, остаётся открытым в научной литературе.

На основе группы работ [56, 88, 140, 196] можно выделить следующие основные свойства цифровых двойников:

- обработка данных в режиме реального времени;

- интегрируемость с другими системами;
- точность моделирования (оценка важности параметров для решения задачи двойника, оценка качественных показателей функционирования, оценка возмущений);
- взаимодействие компонентов и организация каналов связи (оператор, технолог, руководитель и т.д.);
- сходимость (принятие единого и максимально оптимального решения);
- масштабируемость (возможность репликации двойника, расширения набора параметров модели);
- структура организации и совместимость (модульный принцип, позволяющий создавать большие системы на основе концепции Интернета вещей, технологий дополненной реальности и др.);
- принципы работы с данными (оперирование большими данными, хранение, ведение журнала, режимы доступа и т.д.);
- эффективность (минимизация численности человеческих ресурсов, оперативное принятие управленческих решений, общее сокращение издержек);
- планирование (моделирование жизненного цикла объекта в зависимости от изменяющихся условий с последующим управлением);
- надёжность (стабильность обработки данных, автономность, дистанционное управление).

Также было показано [88, 105, 136], что применение цифрового двойника даёт возможность предприятиям:

- реализовывать эффективное управление и коррекцию технологических процессов;
- осуществлять прогнозирование выполнения технологических процессов в надлежащем виде через определение вероятности возникновения сбоев и отказов оборудования, а также на основе предполагаемых качественных характеристик будущих изделий;
- уменьшать время наладки технологических процессов для производства нового изделия;
- получать аналитические данные для использования на других производственных уровнях.

В качестве примера влияния применения цифровых двойников на эффективность производства предлагается [88] оценить разные аспекты его

возможного вклада на каждом производственном уровне. Например, на этапе проектирования объекта становится возможным оптимизировать эффективность производства продукта и оценить возможность реализации всех операций процесса обработки изделий; на полевом уровне происходит сокращение времени простоя оборудования, предупреждение его выхода из строя; на уровне принятия управленческих решений повышается быстродействие, а благодаря наборам аналитических данных упрощается задача поиска оптимального решения.

Опыт применения цифровых двойников демонстрирует свою эффективность, однако данное решение не всегда целесообразно. Авторами статьи [83] предлагаются критерии, на основе которых руководитель предприятия или научный сотрудник должны принимать решение о целесообразности его применения. Показано, что наиболее эффективно используется цифровой двойник в случаях осуществления мониторинга технологических процессов, контроля технического состояния, технического сопровождения, продолжительного жизненного цикла изделий, при большом количестве используемого оборудования, которое также может быть труднодоступно для обслуживания и в условиях многорецептурных (многономенклатурных) производств.

1.5 Контроль технологических процессов многорецептурного пищевого производства

1.5.1 Особенности проведения контроля технологических процессов многорецептурного пищевого производства

Проведённый ранее анализ научных исследований выявил большое количество разработанных методик и систем контроля технологических процессов. В соответствии с современным состоянием и тенденциями развития промышленности слабый научный интерес представляют узкоспециализированные, устаревшие решения и подходы, в отличие от тех, которые построены с использованием новейших технологий и подходов, многие из которых обозначены в концепции умного производства.

Учитывая современные тенденции развития и повсеместной организации многорецептурных (многономенклатурных) производств, наибольшую актуальность имеют системы контроля технологических процессов [116], которые бы эффективно решали задачи сбора и анализа производственных данных для таких типов производств. Обзор литературы показал, что научных работ, посвящённых контролю технологических процессов на

многорецептурных (многономенклатурных) производствах, крайне мало, так как большинство из них сосредоточены на операционном контроле [155] или вопросами организации производства [86], либо не оперируют другими категориями данных, либо имеют иные недостатки, что показывает такой тип мониторинга не до конца изученным.

Системы контроля технологических процессов, применяемые на многорецептурных (многономенклатурных) производствах и не позволяющие учитывать разные группы параметров технологических процессов не способны эффективно выполнять свои функции, так как собираемой информации может быть недостаточно для ведения эффективной оптимизации процессов. Например, если система контроля технологических процессов не учитывает качество выпускаемых изделий, то она оказывается лишена обратной связи на основе выходных показателей. По этой причине не реализуется учёт рассогласования требований к качеству выпускаемых изделий и их реальных характеристик, полученных в результате реализации технологических процессов. Сами технологические процессы характеризуются, как сложные, многопараметрические и многосвязные, а система их мониторинга может не обеспечивать необходимое качество и эффективность контроля параметров. Следовательно, можно утверждать, что без анализа качества выпускаемых изделий система контроля технологических процессов может быть неэффективной. В другом случае, при отсутствии контроля над организационными параметрами технологических процессов, такими как план выпуска, операционное время и другими невозможно говорить об эффективности реализации технологических процессов, так как изделия могут быть произведены не вовремя, не в том количестве и т.д.

В условиях многорецептурных (многономенклатурных) производств при реализации технологических процессов могут применяться не соответствующие требованиям технолога инструменты, станки, оборудование, человеческие ресурсы, что напрямую может привести к возникновению брака. Учитывая разнородность причин возникновения брака, можно утверждать, что эффективный контроль технологических процессов должен учитывать разные группы параметров производственного процесса.

В условиях таких производств одновременно реализуется множество технологических процессов и рецептов, поэтому традиционные методы контроля технологических процессов из-за их масштабирования становятся неудобными и неэффективными.

Из-за появления всё большего числа производств, которые подвержены проблемам обеспечения эффективности функционирования, сокращения издержек и кастомизированного спроса, можно утверждать, что мониторинг технологических процессов многорецептурных (многономенклатурных) производств является важной актуальной научной проблемой, требующей решения.

1.5.2 Современные направления развития производства в РФ

Актуальность проведения исследований в области цифровых технологий подтверждается положениями различных государственных программ.

Например, национальная программа РФ «Цифровая экономика» [39] включает в себя развитие практики применения новых производственных технологий, таких как большие данные, искусственный интеллект и др. Наибольшую корреляцию можно наблюдать между тематикой данной работы и разделом национальной программы по развитию новых цифровых технологий, где особое внимание уделено применению цифровых технологий моделирования (включая цифровые двойники), технологий умных производств, управлению жизненным циклом и др.

В дорожной карте Национальной технологической инициативы «Технет» [109] одной из целей обозначено развитие высокотехнологичных отраслей промышленности, которые включают использование передовых технологий для построения цифровых, умных и виртуальных фабрик будущего.

Государственная программа «Развитие промышленности и повышение её конкурентоспособности» [229] также подтверждает актуальность тематики диссертационного исследования, так как в задачи программы входит задача создания инновационной инфраструктуры для развития традиционных и новых отраслей промышленности, что включает использование современных производственных информационных технологий.

Ключевые направления стратегического планирования и обрабатывающих отраслей промышленности представлены в распоряжении Правительства Российской Федерации от 6 ноября 2021 г. № 3142-р [227]. Данное распоряжение описывает направления стратегического планирования и развития в области цифровой трансформации этих отраслей, в рамках которых будут реализовываться проекты по направлению инноваций в организации производства. Проекты, входящие в состав распоряжения нацелены на решение проблем предприятий, связанных с низкой

производительностью труда, нерациональным использованием ресурсов, низкой эффективностью производственных мощностей, высокой долей брака и другими.

В рамках выделенных стратегий развития производств предполагается реализация проектов «Умное производство» и «Цифровой инжиниринг». Проект «Умное производство» нацелен на формирование эффективной инфраструктуры и системы поддержки внедрения российского программного обеспечения и программно-аппаратных комплексов, а среди решаемых задач в рамках проекта можно выделить обеспечение доступности информации о технологических и производственных возможностях предприятий. Проект «Цифровой инжиниринг» нацелен на создание единой национальной системы стандартизации и сертификации, ориентированной на формирование единых форматов данных (библиотек), переходу к кастомизированной промышленной продукции и использовании технологии цифровых двойников.

Все перечисленные проекты и программы необходимы для решения главной задачи развития производства — повышения его эффективности, связанного с его цифровой трансформацией. Во многих статьях [38, 58, 112] было неоднократно показано, что цифровая трансформация направлена на повышение эффективности деятельности промышленных предприятий, т.е. является главным средством решения одной из ключевых проблем развития современных предприятий [227], связанной с обеспечением этой эффективности.

Разработка системы контроля технологических процессов, построенная на востребованной в рамках правительственных программ развития производственных предприятий концепции цифровых двойников этих процессов, обеспечивает цифровую трансформацию производства, которая может повлечь необходимое повышение эффективности его деятельности.

1.5.3 Актуальность разработки новых методов и алгоритмов контроля технологических процессов

В данном разделе рассматривается пример реальной системы мониторинга и ресурсного обеспечения выполнения производственного задания и производственного плана, которая была разработана и внедрена 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».

Данная система решает следующие задачи:

- 1) определение реализуемости производственного плана в текущих условиях его выполнения;
- 2) определение и контроль ключевых параметров реализуемости производственного плана;
- 3) предоставление диспетчеру полнофункционального инструментария контроля и управления технологическим процессом.

Данная система мониторинга функционирует на основе реализуемого технологического процесса, производственного плана и разработанной методики прогнозирования выполнимости процесса. Информация для решения поставленных задач поступает в систему из производственного задания, данных диагностического оборудования, станков с ЧПУ и другого автоматизированного технологического оборудования цифрового машиностроительного производства.

В состав информационной системы мониторинга входит система экспертной оценки, которая для каждого станка формирует максимально возможный набор факторов, влияющих на надёжность работы станка и выполнения технологической операции. Этот набор параметров передаётся в модель анализа, которая на основе метода Парето осуществляет отбор минимально необходимого набора параметров в зависимости от технологического процесса на данном станке. В результате для каждой операции по отношению к технологическому процессу определяется вероятность сбоя.

По результатам мониторинга ресурсного обеспечения технологического процесса, выполнения производственного задания и плана формируется отчётность в зависимости от используемой рабочей станции: отчётность о рабочих программах для руководителя, отчеты о выполнении сменно-суточного задания, проблемах и логистике для операторов и отчётность о ресурсном обеспечении производственного задания производственных участков для диспетчеров.

Функциональная схема системы мониторинга (рис. 10) показывает, как посредством стандартных интерфейсов осуществляется сбор данных на основе показаний датчиков оборудования и ЧПУ с использованием функционала SCADA-системы и OPC-сервера.

Данная система мониторинга была испытана на обособленном производственном подразделении ЗАО Производственная компания «Станкопресс» г. Коломна в цехе механической обработки малых и средних деталей, где применяются обрабатывающие центры с ЧПУ для выпуска серийных и единичных деталей.

Далее рассматривается другая система мониторинга, которая отслеживает такую группу параметров, как состояние технологического оборудования. На основе этого автоматизированная информационная система (АИС) «Диспетчер», которая является коммерческим продуктом ООО «Цифра», может быть рассмотрена, как пример системы мониторинга технологических процессов.

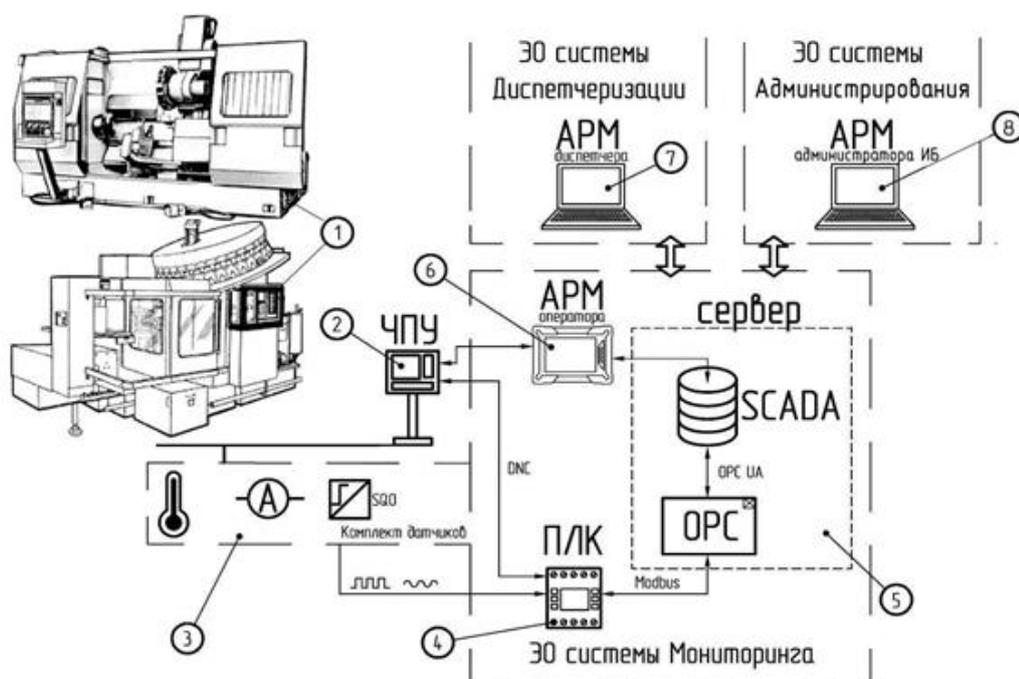


Рисунок 10 — Функциональная схема системы мониторинга ПНИЭР.

1 — технологическое оборудование; 2 — система ЧПУ; 3 — комплект датчиков; 4 — программируемый логический контроллер. Служит для сбора данных с дополнительных датчиков, а также для информационного обмена с устаревшими версиями СЧПУ (без реализации высокоскоростных программных интерфейсов); 5 — OPC-сервер — программное средство унификации интерфейсных протоколов различных ПЛК; 6 — АРМ оператора – аппаратное средство коммуникации с подсистемами Комплекса; 7 — АРМ диспетчера; 8 — АРМ администратора ИБ.

АИС Диспетчер — это система мониторинга промышленного оборудования, состоящая из нескольких прикладных подсистем-модулей.

Функционал модулей реализован в нескольких программах: «Сервер АИС Диспетчер», «Клиент АИС Диспетчер» и других.

Система мониторинга АИС Диспетчер позволяет контролировать работу промышленного оборудования различных моделей, годов выпуска, имеющих разные системы управления. В связи с этим АИС обеспечивает различные способы получения данных и варианты подключения оборудования. Данные могут быть получены как в автоматическом режиме, так и с помощью ручного ввода.

Измеряемые параметры контролируются в АИС Диспетчер как с помощью сигналов, поступающих непосредственно от устройств управления оборудованием (систем ЧПУ, контроллеров), так при помощи специальных аппаратных устройств. В АИС Диспетчер используются аппаратные устройства собственного производства и других производителей. С помощью этих устройств собираются следующие группы параметров для контроля: технические (нагрузка на шпиндель, ток агрегатов, параметры вибрации, температура агрегатов и др.), технологические (скорость шпинделя, контурная подача, счётчик деталей и др.) и энергетические (активная и полная энергии). Кроме собираемых параметров АИС Диспетчер способен работать с данными времени работы персонала.

На основе собранных данных данная система может выполнять анализ эффективности работы оборудования, планирование производства через отслеживание цепочки производственного цикла, подсчёт изготовленных деталей и учёт брака.

В условиях многорецептурного пищевого производства могут применяться также SCADA-системы. Например, WinCC ОА позволяет фиксировать параметры реализуемого технологического процесса и проводить предобработку данных перед их архивацией и передачей на другие уровни автоматизации.

Кроме цифровых систем, на пищевых производствах применяются системы контроля качества на основе контрольных точек. Система ХАССП (НАССР — Hazard Analytics Critical Control) часто применяется при выявлении, контроле, анализе и управлении рисками при изготовлении пищевой продукции, к которой вафли также относятся. Данная система была разработана в основном для обеспечения микробиологической безопасности пищевых продуктов на основе метода контроля критических контрольных точек.

В условиях производства вафель и, вообще, мучных кондитерских изделий применяются операции термической обработки, поэтому готовые изделия выходят стерилизованными без возможного наличия микроорганизмов. Исходя из этого, можно утверждать, что основными источниками опасности для потребителя и системы контроля качества вафель являются посторонние включения (примеси и инородные тела) и загрязнения внешними химическими веществами (ветошь, смазочное масло и пр.).

В системе ХАССП выделяются такие риски, как: биологические, химические и физические и предполагается рассмотрение прежде всего рациональной организации помещений и производственных потоков. Работа данной системы строится на семи принципах:

- анализ рисков на разных стадиях производства,
- выявление критических контрольных точек (ККТ) технологического процесса, которые обладают основным влиянием на качество выпускаемой продукции,
- установка пределов и требований по наблюдению для выбранных параметров для выработки превентивных мер, а также выявление корректирующих воздействий с последующим документированием и внедрением изменений в производство [74, с. 47].

В качестве более широкого аналога часто предлагается система менеджмента безопасности пищевой продукции (СМБПП), в основе которой лежит соответствие по стандарту ISO 22000 для обеспечения выпуска безопасной продукции. Основным отличием СМБПП от ХАССП является то, что кроме использования комплекса документов, производственных процессов и ресурсов СМБПП включает в себя требования по информационному обмену, программы мероприятий и пр. [22, 55, 64].

Выше были рассмотрены примеры современных систем контроля технологических процессов. Выделяя основные характеристики этих систем (табл. 11), можно сделать следующие заключения.

Главной целью применения всех рассмотренных систем контроля является повышение эффективности деятельности предприятий и контроля качества. Это повышение эффективности может достигаться за счёт цифровой трансформации производственных процессов, которая может обеспечиваться использованием рассмотренных систем контроля.

Таблица 11 — Сравнение характеристик рассмотренных систем контроля технологических процессов.

№	Параметр сравнения систем контроля	Мониторинг на АО «Станкопресс»	АИС Диспетчер	WinCC OA	ХААСП	СМБПП
1	Объект контроля	Технологический процесс			Производственный процесс	
2	Режим реального времени	Да	Да	Да	Нет, только превентивный анализ	
3	Источники данных	Производственное задание, датчики, станки с ЧПУ, автоматизированное технологическое оборудование	План-график работы работников, ручной ввод, импорт справочников, датчики, станки с ЧПУ, автоматизированное технологическое оборудование	В основном данные оборудования и производственных систем	Политика предприятия, информация о продукции и производстве на основе ГОСТ Р 51705.1	Политика предприятия, информация о продукции и производстве на основе ISO 22000 (ISO 9001 и ГОСТ Р 51705.1)
4	Выбор параметров	Интеллектуальный и автоматический	Вручную	Вручную	Вручную на основе экспертного анализа	
5	Анализ параметров контроля	Интеллектуальный анализ выполнимости производственного плана	Анализ эффективности работы оборудования	Возможна предобработка данных	Контроль может проводиться редко и как таковой может быть не реализован в принципе	
6	Отчётность	Протокол и отчёты	Статистические отчёты	Отчёт, журнал, лог	Документация и рабочие листы (журналы)	Документация, журналы, требования по информационному обмену, программы мероприятий и пр.
7	Связность с жизненным циклом изделия	В начале и в конце смены	При реализации технологического процесса		На стадии подготовки сырья и стадии производства	
8	Уровень применения	Цех и предприятие	Цех		Цех и предприятие	

Высокое количество брака является причиной возникновения при таком производстве больших издержек и требует понижения для повышения общей эффективности деятельности предприятия, которое может обеспечиваться системами контроля технологических процессов.

В ходе проведения исследований в рамках проекта ПНИЭР RFMEFI58016X0008 на АО «Станкопресс» были получены данные по браку при производстве разных партий из 10 наименований изделий (прил. 5) [9]. В результате анализа этих данных было выявлено, что доля брака колеблется незначительно в пределах от 13 % до 17 % и составляет для всех видов продукции в среднем 13,9 % (табл. 12), что является высоким значением, но соответствует мелкосерийному многономенклатурному типу производства.

Таблица 12 — Обобщённые статистические данные по браку.

№ п/п	Наименование	Общее количество брака, шт.	Доля брака
1	Кольцо коромысла стального нижнее	44	14,2%
2	Вал ротора 1-ой и 2-ой осей	39	14,3%
3	Перемычка коромысла	21	13,6%
4	Коромысло крышка верхняя	27	14,0%
5	Фланец коромысла нижний	35	13,6%
6	Кольцо фиксации ротора 6-ой оси	69	13,7%
7	Корпус предплечья приводной 4-ой оси	22	13,0%
8	Корпус вращения 4-ой оси	23	13,8%
9	Щека2(1) 5 коорд.	43	14,7%
10	Фланец коромысла верхний	39	13,9%

Современные многорецептурные пищевые производства нуждаются в разработке методов и алгоритмов для систем контроля технологических процессов. На таких производствах реализуется постоянное внедрение новых технологических процессов с коррекцией рецептур, осуществляется модификация и оптимизация с целью снижения производственных издержек и повышения эффективности в отношении обрабатываемых технологических процессов, используются и анализируются архивированные процессы, проектируются новые производства с разработкой новых технологических процессов на основе информации о действующих. Из-за большого числа

протекающих технологических процессов увеличивается число работ, выполняемых сотрудниками, по переналадке, проектированию и изменению технологических процессов, принятию решений по изменению параметров протекания операций и других, что увеличивает степень влияния человеческого фактора на качество выпускаемой продукции на разных этапах жизненного цикла изготавливаемых изделий.

Влияние человеческого фактора на качество является сложно измеряемым и отслеживаемым процессом из-за большого числа мягких связей и эмпирическом характере решения многих задач на этапах проектирования и изготовления изделий, когда решения могут приниматься разными лицами с разной квалификацией и из разных подразделений. Можно говорить о том, что на производстве человек может и должен решать много задач, которые не формализованы, из-за чего конечный результат сильно подвержен влиянию человеческого фактора вследствие возможных ошибок при решении этих задач.

В пищевом многорецептурном производстве вафель наблюдается высокая доля издержек, которая составляет 12 % и выше и связана с появлением обрезков, крошек, ломанных деформированных вафель и вафельных листов [77]. Во многом такой высокий показатель связан с несовершенством технологических процессов и постоянной модернизацией и изменением различных факторов на производстве.

В условиях многорецептурного (многономенклатурного) производства не все системы контроля технологических процессов могут дать тот эффект от внедрения, который от них ожидается, что основывается на специфике такого производства, которая была рассмотрена выше. Следовательно, многие системы контроля технологических процессов, разработанные без учёта этой специфики и работающие в таких условиях, могут не дать требуемый рост эффективности. 67

В качестве основных и значимых для исследования недостатков ХАССП следует отметить то, что она не рассматривает параметры технологического процесса и может быть слабо цифровизована. Главным недостатком ХАССП и СМБПП является отсутствие функциональности по оперативному контролю (который может быть очень редким) в режиме реального времени [64].

Система мониторинга выполнимости производственного плана и ресурсного обеспечения на АО «Станкопресс» разрабатывалась для мелкосерийных многономенклатурных производств и рассматривает вопрос

выполнимости производственного плана. АИС Диспетчер выполняет только задачи диспетчеризации и ограничен в наборе параметров для контроля.

Ключевой вопрос, который должен решаться на многорецептурном (многономенклатурного) производстве, заключается в том, как уменьшить влияние человеческого фактора на качество выпускаемой продукции, чтобы эффективность деятельности предприятия оставалось высокой, и оно было конкурентноспособным.

Рассмотренные примеры систем контроля и мониторинга технологических процессов из-за показанных недостатков не могут в полной мере решить обозначенный вопрос, поэтому, можно утверждать, что проектирование и разработка соответствующей методики контроля технологических процессов с целью уменьшения влияния человеческого фактора на качество выпускаемой продукции является актуальной научной задачей. Для реализации этой методики контроля технологических процессов необходима разработка соответствующих методов и алгоритмов сбора и анализа значений параметров технологических процессов.

Умные высокотехнологичные производства нуждаются в увеличении эффективности мониторинга технологических процессов, которое может быть обеспечено через автоматизированную выборку параметров для контроля, которая бы формировалась на основе конструкторской, технологической и производственной документации; через сбор и систематизацию данных со всех производственных систем и технических устройств; автоматизированного анализа в режиме реального времени с формированием цифрового паспорта, протоколов, отчётов и охватывало бы все этапы жизненного цикла изделия.

В условиях многорецептурного пищевого производства вафель разработка методов и алгоритмов контроля технологических процессов также является актуальной научной задачей. Актуальность решения данной задачи обусловлена тем, что при многорецептурном производстве вафель необходимо осуществлять контроль каждой партии изделий и каждой рецептуры, а также каждого технологического процесса. Ранее разные вопросы контроля технологических процессов решались в работах [10, 31, 79], но в них не рассматривался вопрос связи параметров технологических процессов и их ресурсного обеспечения производства вафель с заданными разработчиком в рецептурах в контексте влияния на качество выпускаемой продукции.

Также в условиях многорецептурного производства вафель уже применялся контроль посредством традиционных средств и методов, таких как полевые устройства, ПЛК, SCADA-системы и пр., однако эти методы обеспечивают сбор несвязанных между собой данных, формируя большой набор неструктурированной информации. В таких условиях сведено к минимуму появление брака, так как каждая рецептура реализована в виде отлаженного технологического процесса и отклонения при производстве практически исключены или быстро устраняются с использованием традиционных систем контроля технологических процессов и оборудования. В случае, если рецептура верная, технологический процесс не содержит ошибок, а изготовленная партия вафель соответствует требованиям, то несмотря на это на рынке она может провалиться в продажах, могут возникнуть проблемы при хранении изделий, может иметь низкие органолептические показатели или быть неконкурентоспособной, что обусловлено влиянием человеческого фактора на качественные показатели выпускаемой продукции. Для решения таких проблем может потребоваться большое количество времени и трудозатрат из-за того, что потребуется сопоставление и поиск параметров партии среди множества несвязанных данных, хаотичность которых усложнена многорецептурностью производства вафель.

Вообще, модернизация действующего производства предполагает процесс сбор и анализ большого количества данных для обозначения проблемы и целеполагания. Этот процесс является трудоёмким и во многом определяет успешность реализации последующих этапов модернизации. Таким образом, можно утверждать, что то, насколько качественно и полно будут собраны исходные производственные данные, зависит степень адекватности модели и эффективность проведения этапов модернизации (уменьшение количества итерации, более точное моделирование и достижение поставленной цели) (рис. 11).

Для решения обозначенных выше задач актуальна разработка новых методов и алгоритмов контроля технологических процессов в условиях многорецептурного производства вафель, которая позволит обеспечивать цифровизацию предприятий пищевого производства, повышать эффективность их деятельности и обеспечивать производственными данными задачи модернизации действующих предприятий, повышая эффективность решения этих задач.

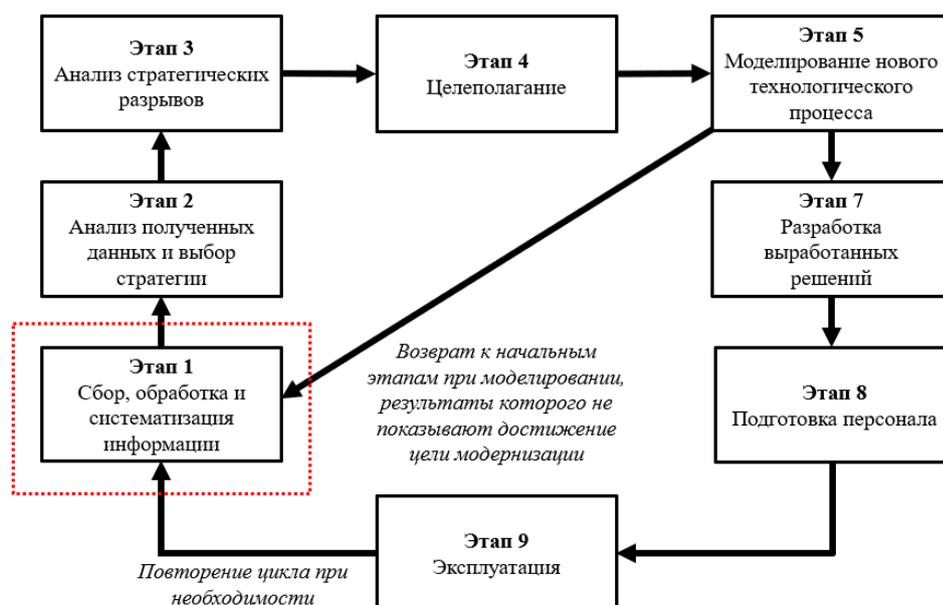


Рисунок 11 — Схема модернизации производства.

1.5.4 Постановка задачи исследования

На основе выполненного литературного обзора и анализа аналогов систем контроля обозначена актуальность решения задачи разработки методов и алгоритмов для системы контроля технологических процессов в условиях многоцептурного пищевого производства. Решение этой задачи должно обеспечивать цифровую трансформацию предприятия, приводящую к повышению эффективности реализации производственных процессов через снижение влияния человеческого фактора на качество выпускаемой продукции и повышению эффективности и скорости процессов принятия управленческих решений.

Для решения этой задачи необходимо разработать концептуальную модель контроля технологических процессов в указанных условиях с применением технологии цифровых двойников процессов для обеспечения цифровой трансформации предприятия. При проработке этой модели необходимо рассмотреть возможности её применения на разных стадиях жизненного цикла технологических процессов и изделий для более полного цифровизации различных процессов.

Далее необходимо проработать различные аспекты концептуальной модели: определиться со структурой цифрового двойника процесса, разработать необходимые методы и алгоритмы его создания и применения, разработать методику их комплексного использования. В следствие того, что аспект контроля и вообще сбор данных предполагает их целевое использование для решения задач управления, то следует рассмотреть аспект

формирования управляющего воздействия на технологический процесс, который может быть рассмотрен в виде разработки подсистемы поддержки принятия решений с разработкой всех необходимых для этого структурно-параметрических и математических моделей. В завершение необходимо предложить модель системы контроля технологических процессов с подсистемой поддержки принятия решений и оценить возможные эффекты внедрения разработанных методов и алгоритмов.

1.6 Выводы по главе 1

Обзор современных методов контроля технологических процессов позволил сделать следующие выводы.

Анализ и классификационный подход к современным системам мониторинга позволил выявить потребность строить сложные системы контроля, в которых реализованы все классификационные элементы для осуществления полной цифровизации производств в соответствии с современным уровнем развития науки и техники.

Проблема влияния человеческого фактора на качество выпускаемой продукции в условиях многорецептурного пищевого производства является актуальной и требует решения для развития производств в соответствии с особенностями современного рынка и цифровой экономики.

Современные системы контроля технологических процессов не позволяют в полной мере решать задачу снижения влияния человеческого фактора на качество выпускаемой продукции условиях многорецептурного пищевого производства, а также являются малоэффективными при постановке задачи модернизации и построения новых технологических процессов и производств.

Современная тенденция цифровизации различных процессов на предприятиях активно стимулирует развитие перспективной концепции «цифрового двойника» (процесса, объекта, изделия, производственной системы и пр.).

Задача контроля технологических процессов в условиях многорецептурного пищевого производства вафель может быть решена с помощью цифрового двойника, как одного из инструментов моделирования, неоднократно доказавшего свою эффективность при решении задач автоматизации на производстве.

2 РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ И АЛГОРИТМОВ КОНТРОЛЯ МНОГОРЕЦЕПТУРНОГО ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ПРОИЗВОДСТВА ВАФЕЛЬ НА ОСНОВЕ ТЕХНОЛОГИИ ЦИФРОВОГО ДВОЙНИКА

2.1 Применение цифрового двойника в условиях многорецептурного пищевого производства

2.1.1 Требования к контролю процессов в условиях многорецептурного пищевого производства

В соответствии с постановкой задачи диссертационного исследования разрабатываемый подход к контролю должен обеспечивать эффективный сбор и хранение данных о технологических процессах в условиях многорецептурных пищевых производств. Такой подход должен отвечать требованиям гибкости и масштабируемости, чтобы при наличии производственной необходимости он мог охватывать необходимое количество технологических процессов при малом объёме затрат на масштабирование.

Эффективность использования подхода формируется на основе его применимости в режиме реального времени, когда сбор и последующий анализ данных в таком режиме может обеспечивать реализацию оперативного контроля данных и параметров и принятие оперативных решений по недопущению возникновения производственного брака и снижать влияние человеческого фактора на качество выпускаемой продукции. В случае невозможности работы в режиме реального времени собранная в процессе такого контроля информация может быть неактуальной или иметь низкую ценность и значимость, поэтому необходимо как минимум обеспечивать «мягкий режим реального времени».

Для контроля технологических процессов в режиме реального времени необходимо осуществлять первичный анализ параметров технологического процесса и его ресурсного обеспечения. Такой анализ может быть построен на основе сравнения текущих значений параметров каждого технологического процесса с требуемыми, которые могут быть определены в идеальном технологическом процессе в виде модели и описаны в технической и конструкторской документации [164].

Основной задачей подхода является обеспечение не просто сбора данных, который и так уже доступен, а систематизации получаемых данных, которые должны быть структурированы для эффективного анализа и синтеза управляющих решений на основе результатов такого анализа.

2.1.2 Оценка применимости концепции цифрового двойника для контроля многорецептурных технологических процессов

В условиях пищевого производства и трендов применения положений концепции умного производства [227] описанные выше требования могут быть удовлетворены за счёт применения цифровых двойников процессов, содержащих все заданные целевые значения, характеризующие то, как должен быть выполнен данный технологический процесс и какими ресурсами он должен быть обеспечен. В Главе 1 было показано, что концепция цифрового двойника процесса может решать задачи контроля технологических процессов, способствовать цифровой трансформации с целью повышения эффективности деятельности предприятия.

Применение цифровых двойников, как информационных моделей процессов, может позволить реализовать принцип объектно-ориентированности при хранении параметров технологических процессов и их ресурсного обеспечения для гибкости метода при моделировании процессов изготовления продукции разной номенклатуры, рецептуры и назначения. Кроме этого, такие информационные модели могут обеспечивать их быстрое копирование и изменение, что важно в условиях наличия большого числа двойников процессов. Такой подход позволяет эффективно решать задачи масштабирования при увеличении числа реализуемых технологических процессов, что говорит о его гибкости при изменении производственных условий, и, как следствие, о эффективности применения при кастомизированном производстве.

Используя новый подход к контролю технологического процесса на основе его цифрового двойника, должны быть разработаны соответствующие алгоритмы, позволяющие реализовывать данный подход в условиях многорецептурного пищевого производства. Эти алгоритмы должны включать этапы создания цифрового двойника технологического процесса, его использования для сбора и дальнейшего анализа данных, архивации с целью будущего применения, учитывать взаимодействие с различными источниками данных и реализовывать функцию сравнения требуемых значений параметров технологических процессов и целевых, задаваемых технологом или разработчиком рецептуры. Необходимые алгоритмы контроля технологических процессов должны учитывать специфику применения разрабатываемой методики в условиях многорецептурного (многономенклатурного) пищевого производства и предоставлять возможность оперировать различными типами и группами данных о

технологических процессах: организационными, операционными, ресурсными, технологическими и др., которые могут быть численными, текстовыми, временными и т.д.

Предполагаемая концептуальная модель контроля на основе технологии цифрового двойника может рассматриваться не только как набор алгоритмов, правил и методов, а как будущая основа новой системы, которая в свою очередь уже предполагает наличие интерфейса оператора, организацию методов хранения и сбора данных, проведение аналитики и ведение отчётов. Такая система контроля на основе концепции цифрового двойника должна обеспечивать возможности её внедрения в реальных производственных условиях.

Ранее неоднократно показывались различные решения задач контроля технологических процессов на основе концепции цифрового двойника. Например, в работе [83] рассматривалось применение цифровых двойников для сбора данных в условиях мелкосерийных многономенклатурных производств, выпускающих изделия с длительным жизненным циклом. Также авторами работ [148, 155] была показана применимость концепции цифровых двойников для задач контроля технологических процессов с учётом рассмотренных его характеристик, а в работе [31] цифровой двойник процесса пищевого производства предлагается для оперативного контроля.

Таким образом, предлагаемая методика контроля технологического процесса на основе его цифрового двойника может стать эффективным [129, 160, 171] решением проблемы сбора и анализа данных на высокотехнологичном многорецептурном пищевом производстве

2.1.3 Концептуальная модель контроля на основе двух типов цифровых двойников технологического процесса

Следуя изложенной оценке применимости технологии цифровых двойников процессов к контролю технологического процесса, формируется гипотеза данного научного исследования. Она заключается в том, что решение задачи повышения эффективности контроля технологических процессов в условиях пищевого производства может быть достигнуто через применение концепции цифрового двойника для систематизации производственных данных.

Для дальнейшего использования концепции цифровых двойников необходимо дать частное определение сущности цифрового двойника, соответствующее задачам данной работы.

Согласно статье [157] цифровой двойник является информационной моделью, которой присущи свойства гибкости и динамики. Эти свойства позволят создать такой цифровой двойник, который может применяться на различных производствах для выпуска пищевой продукции разной рецептуры.

Конечная цель контроля технологического процесса заключается в обеспечении заданного уровня качества обрабатываемых изделий на основе установленных технологических параметров технологических процессов. В то же время главной задачей предприятия является выпуск качественного продукта, близкого к требуемому, а для этого необходимо, чтобы технологический процесс выполнялся в соответствии с заданием. Это означает, что все его параметры, которые влияют на качество и время производства изделий должны также быть близки к заданным. Чтобы решить данную задачу следует выполнить сравнение заданных значений параметров технологических процессов и тех, которые появляются в процессе его реализации при производстве. Отклонение текущих значений параметров технологических процессов от заданных может быть обусловлено:

- износом оборудования,
- неидентичностью составов применяемых пищевых продуктов и добавок,
- различиями в подготовке и квалификации рабочих,
- изменяющимися условиями внешней среды и т.д.

Каждая партия изготавливается в уникальных условиях, которые в рамках допустимых пределов могут влиять на отклонения параметров протекающего технологического процесса и его ресурсного обеспечения от заданных значений. Чтобы решить задачу контроля технологического процесса нужно сравнить его заданные разработчиком рецептуры (технологом) значения и текущие, которые привязаны к конкретной партии изделий, производимой в определённый момент времени. Для выполнения этого сравнения система контроля технологических процессов должна оперировать наборами заданных и текущих значений параметров таких процессов, а также набором правил для сравнения этих значений и последующего вывода отчёта о результатах выполненного контроля технологических процессов.

Цифровые двойники, которыми оперирует проектируемая система контроля технологических процессов, должны обладать следующими свойствами:

- 1) являться отображением заданного и реализуемого (физического) технологического процесса;

- 2) представлять собой информационную модель технологического процесса и объекта с небиективным способом идентификации;
- 3) быть гибкой и динамической информационной структурой;
- 4) обеспечивать информационными связями с реальными технологическими объектами в режиме реального времени;
- 5) использоваться с применением современных интеллектуальных технологий [25, 126].

Для разработки концептуальной модели контроля технологических процессов уточним следующие определения.

Цифровой двойник технологического процесса представляет собой информационно-логическую структуру, которая определяется ключевыми параметрами технологических процессов и их протеканием. Такой цифровой двойник является многоуровневой структурой, которая имеет объектно-ориентированную иерархию, состоящую из классов и подклассов, определяющих и описывающих реализуемый технологический процесс. Это описание строится на информации об этом технологическом процессе в виде его параметров, значений, единиц измерений и т.д. Цифровой двойник организован по принципу информационно-логической структуры, которая включает входные и выходные данные каждой операции и условия перехода между ними.

Следуя этой идее и данному определению, сформируем структуру диссертационного исследования и концептуальную модель контроля технологических процессов (рис. 12 и 13). Система оперирует данными о заданном и реализуемом технологическом процессе, т.е. использует два типа двойников, содержащих параметры технологического процесса.

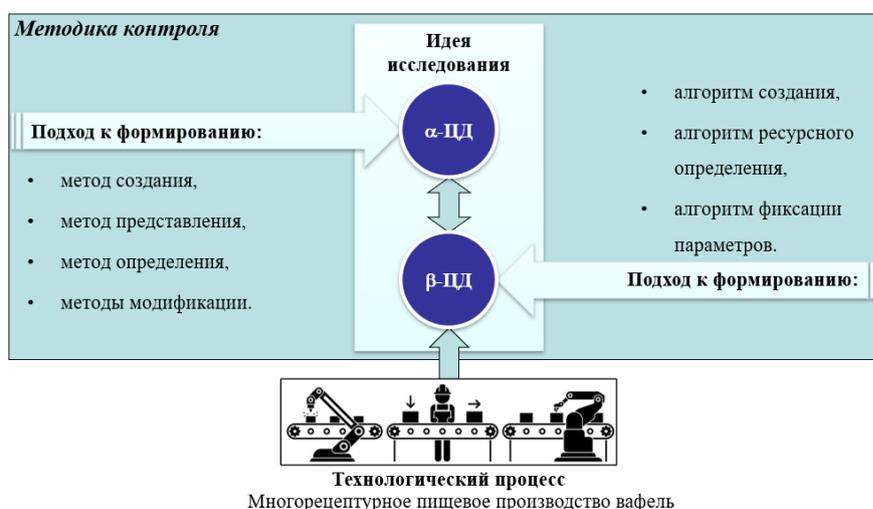


Рисунок 12 — Структура концептуальной модели контроля технологических процессов.

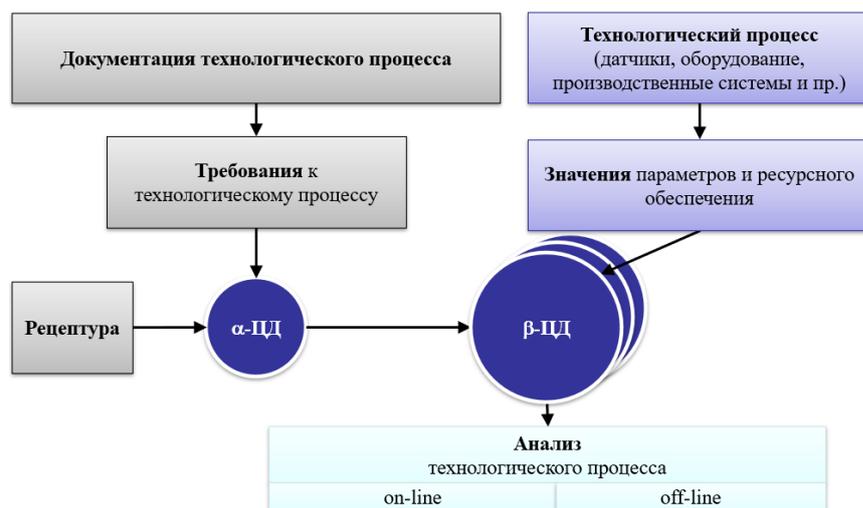


Рисунок 13 — Концептуальная модель контроля технологических процессов.

Цифровой двойник технологического процесса, создаваемый разработчиком рецептуры, доопределяемый технологом и содержащий параметры технологического процесса и его предполагаемого ресурсного обеспечения, будем называть α -ЦД. Цифровой двойник технологического процесса, созданный на основе реализуемого технологического процесса и содержащий фактические значения параметров обработки конкретной партии изделий и применённых ресурсов, будем называть β -ЦД (рис. 13).

α -ЦД является динамической моделью технологического процесса, а β -ЦД — статической. Это обусловлено тем, что α -ЦД создаётся технологом или разработчиком рецептуры в зависимости от организации производства на этапе проектирования технологического процесса, а затем может подвергаться модификации с целью оптимизации и устранения ошибок в процессе производства изделий. В момент производства изделия создаётся β -ЦД на основе значений параметров и ресурсов технологического процесса, которые сохраняются и не изменяются.

Свойства и функции α -ЦД и β -ЦД (табл. 13) позволяют говорить о том, что этапы их применения повторяются итерационно и связаны со стадиями реализации технологических процессов и жизненными циклами изделий.

2.1.4 Жизненный цикл цифровых двойников технологического процесса

Ранее неоднократно подчёркивалось, что цифровой двойник применяется на всех этапах жизненного цикла изделий [37], но в отношении цифрового двойника технологического процесса термин «жизненный цикл» в литературе не используется. Для того, чтобы понять в каком промежутке времени относительно этапов производства изделия существует цифровой двойник

технологического процесса, когда использовать разрабатываемую методику и будущую систему контроля, следует ввести термин «жизненный цикл цифрового двойника технологического процесса». Под жизненным циклом цифрового двойника технологического процесса будем понимать совокупность повторяющихся процессов от стадии создания цифрового двойника и до его утилизации.

Таблица 13 — Характеристики α -ЦД и β -ЦД.

Название	α -ЦД	β -ЦД
Назначение	Хранение требований к технологическому процессу в виде набора параметров и допусков фиксируемых параметров.	Хранение значений параметров и ресурсов технологического процесса производства изделий.
Объект моделирования	Привязан к технологическому процессу, не связан с производимыми изделиями.	Привязан к партии изделий.
Тип модели	динамическая	статическая
Время существования	Существует на протяжении реализации технологического процесса.	Возникает при производстве продукта (партии) и существует на протяжении всего его жизненного цикла.
Формирование	Полностью формируется в процессе разработки рецептуры и технологического процесса и полностью определяется до введения его в реализацию.	Проходит стадии определения значений ресурсов и параметров технологического процесса с начала его реализации и до момента выпуска изделий.
Основы формирования	Создаётся разработчиком рецептуры (технологом).	Строится на основе α -ЦД, добавляются собственные поля, которые будут хранить значения параметров и ресурсов технологического процесса.

Определим этапы жизненного цикла цифрового двойника технологического процесса (рис. 14). Как было показано ранее, α -ЦД формируется при разработке технологического процесса разработчиком рецептуры (технологом) и существует в процессе его реализации, но после завершения выпуска изделия α -ЦД передаётся в архив и утилизируется. Под архивированием понимается процесс передачи цифрового двойника в информационное хранилище с возможностью оперативного доступа, а под утилизацией – передачу цифрового двойника в архив долговременного

хранения без возможности оперативного доступа, откуда он может быть удалён или переведён обратно в область (состояние) оперативного доступа.

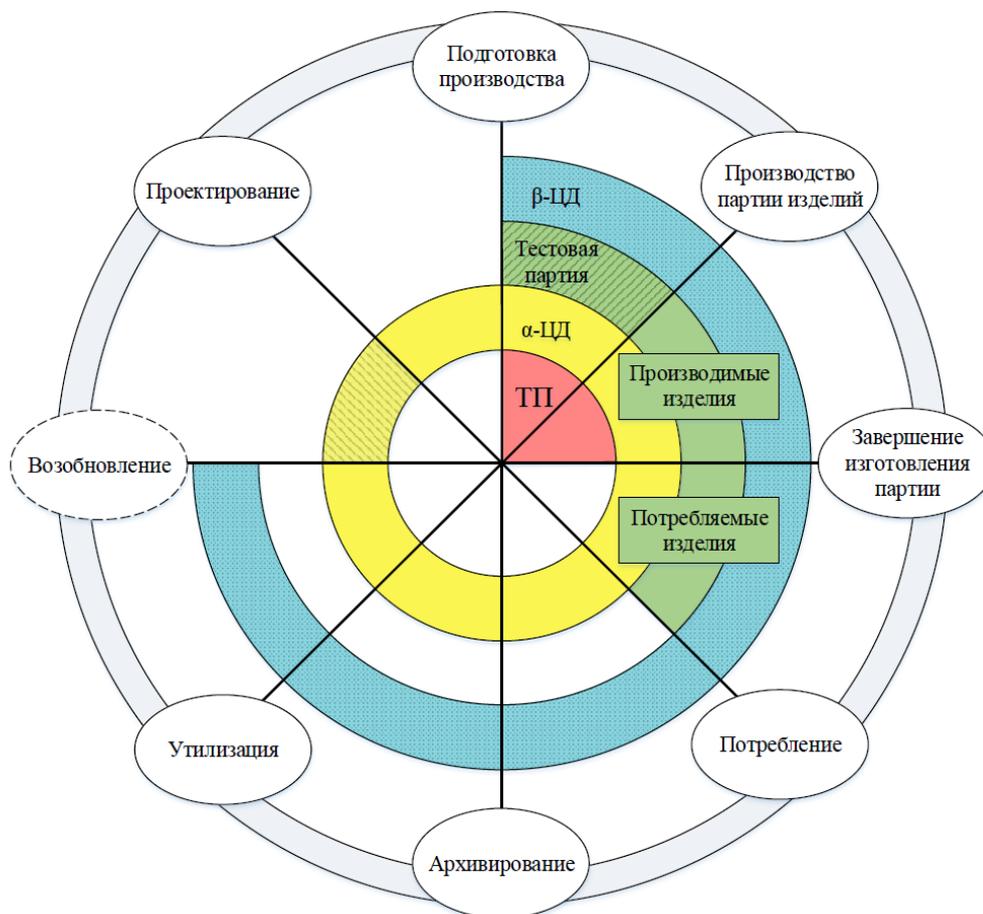


Рисунок 14 — Жизненный цикл цифрового двойника технологического процесса.

β -ЦД создаётся на основе α -ЦД в процессе производства изделия, к которому он привязан, а затем хранится и используется на протяжении всего жизненного цикла изделия без изменений. При производстве он используется для контроля технологического процесса, для анализа полученных значений, а также может использоваться для послепродажного обслуживания и т.д.

Таким образом, жизненный цикл α -ЦД начинается с этапа его создания разработчиком рецептуры (технологом) и заканчивается на передаче в архив для оперативного доступа на этапе проектирования технологического процесса, на котором также определяются требования к технологическому процессу и разрабатывается соответствующая документация. На этапе подготовки производства изготавливается тестовая партия и формируются тестовый β -ЦД, а если такой этап отсутствует, то первые β -ЦД формируются сразу на стадии производства. При завершении заказа все β -ЦД архивируются и передаются на долговременное хранение, после чего их жизненный цикл заканчивается без возможности возобновления, так как β -ЦД является

источником данных, которые связаны с определённым изделием, а не технологическим процессом.

По выполнению всего заказа изделия отгружаются заказчику, а цифровые двойники продолжают проходить этапы своих жизненных циклов. α -ЦД после выполнения заказа архивируется вместе со всеми его версиями без возможности оперативного доступа, а β -ЦД в зависимости от задач разработчика может использоваться для задач анализа и оптимизации производства. В случае если поступит заказ на производство аналогичных видов изделий, α -ЦД запрашивается из архива, модифицируется с учётом новых условий и требований и снова используется в работе, далее цикл повторяется. При ликвидации или преобразования предприятия цифровые двойники могут быть уничтожены (утилизированы) по причине ненадобности.

2.2 Методы создания, модификации, представления и структура цифрового двойника технологического процесса при его контроле

Одним из наиболее важных этапов жизненного цикла цифровых двойников технологических процессов является их создание (рис. 15).

Прежде всего для пищевого производства разработчиком создаётся рецептура, на основе которой технолог создаёт документацию к технологическому процессу [33, 60]. На этапе проектирования α -ЦД автоматизировано создаётся его структура, содержащая параметры технологического процесса и его ресурсного обеспечения, а затем этот цифровой двойник проходит все стадии жизненного цикла. При возникновении необходимости внести коррекцию в α -ЦД из-за модификации или на основе данных отладки создаётся его новая версия. Модификация α -ЦД возможна под влиянием внешних и внутренних условий, поэтому будем их различать и дадим необходимые определения (рис. 16).

Под внешней модификацией цифрового двойника мы понимаем процесс внесения в него вынужденных изменений и создания его новой версии вследствие внешних причин, связанных с изменением основных характеристик изделия, состава, материала, изменения производственных условий и т.д., а под внутренней модификации двойника — процесс его совершенствования без создания новой версии вследствие внутренних причин, связанных с ошибками при разработке, мероприятиями по повышению эффективности производства [117], и т.п.

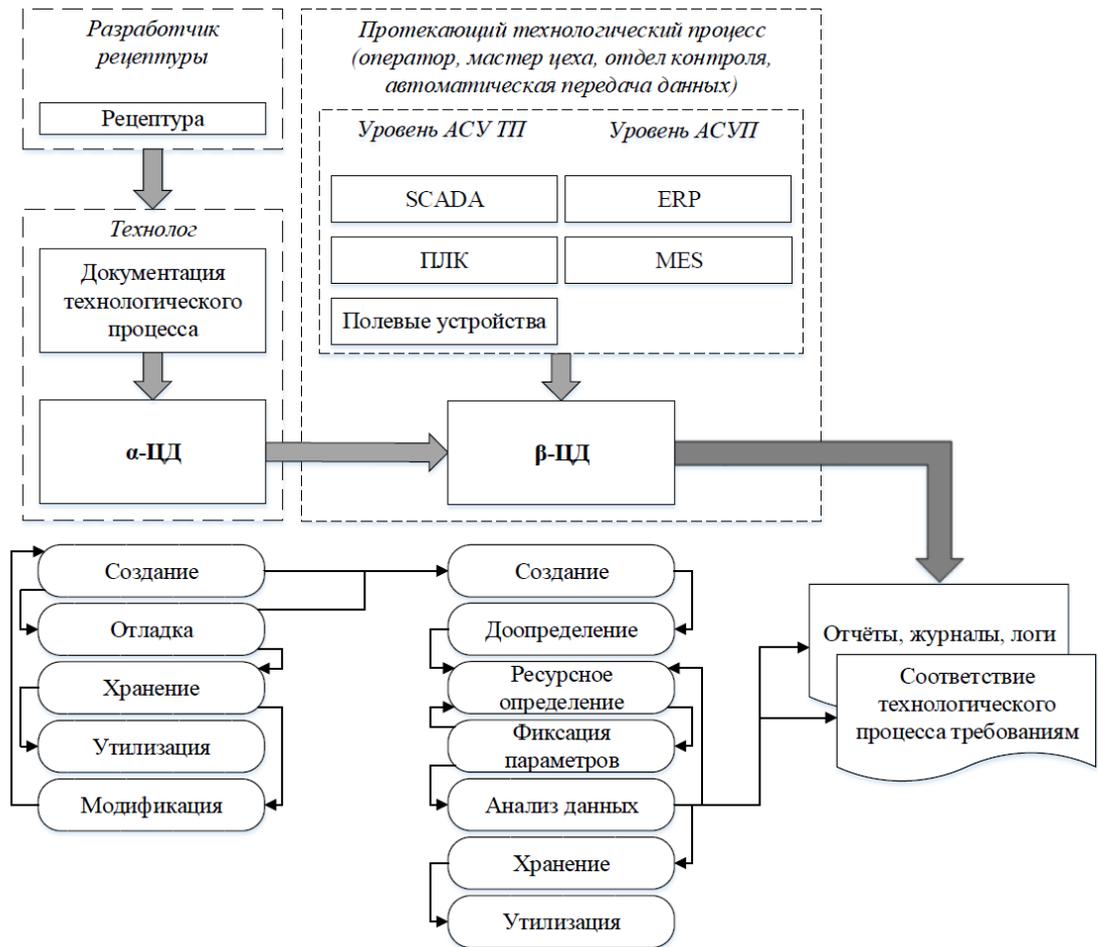


Рисунок 15 — Метод создания цифровых двойников технологического процесса.

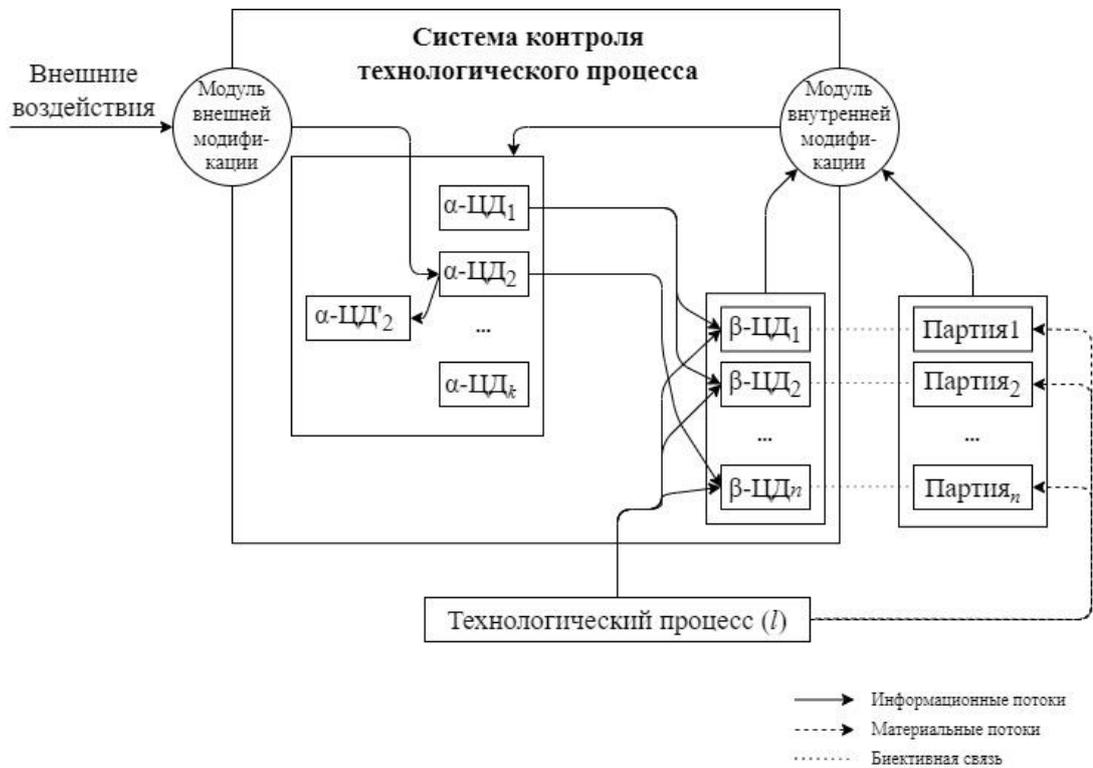


Рисунок 16 — Метод внешней и внутренней модификации цифрового двойника технологического процесса.

На этапе запуска производства на основе α -ЦД создаётся β -ЦД, после чего реализуются функции контроля посредством добавления дополнительных полей, доопределения для хранения значений фиксируемых параметров технологического процесса и применяемых ресурсов.

По завершению производства изделия β -ЦД используется для выполнения анализа данных, полученных в процессе контроля технологического процесса, в результате чего система показывает, соответствует ли выполненный технологический требованиям технолога.

После выполнения всего заказа изделия отгружаются заказчику, цифровые двойники продолжают проходить этапы своих жизненных циклов, α -ЦД в это время архивируется вместе со всеми его версиями без возможности оперативного доступа.

Исходя из определения цифрового двойника технологического процесса, он должен включать различные данные в виде параметров, характеризующих технологический процесс и его ресурсное обеспечение [150, 173]. Набор этих параметров технологических процессов, описывающих требования технолога к его выполнению, можно представить в виде объектно-ориентированной структуры, с помощью которой реализуется метод представления данных (рис. 17).

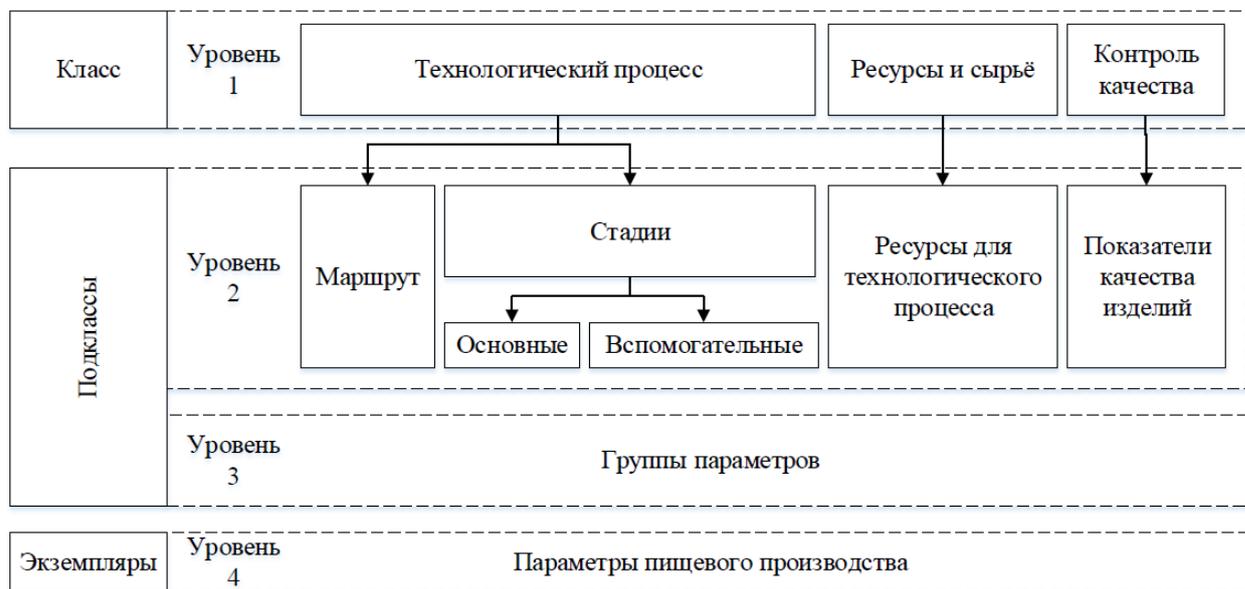


Рисунок 17 — Объектно-ориентированная структура параметров и ресурсов цифрового двойника технологического процесса.

Предлагаемая структура параметров цифрового двойника включает в себя классы параметров технологических процессов, контроля качества и ресурсов, которыми располагает цех (первый уровень). Класс технологического процесса содержит пять подклассов (второй уровень):

маршрут, вспомогательные и основные стадии изготовления изделий, ресурсы технологического процесса и выходные показатели качества изделий. Каждый из этих подклассов разбивается на более мелкие подклассы (третий уровень), которые объединяют укрупнённые группы параметров и ресурсов технологического процесса. В подклассе «маршрут» такими группами являются очерёдность и временные затраты, а в подклассе «стадии» — их различные типы, например, выпечка, резка, фасовка и др. К ресурсам относятся сырьё, информационное обеспечение, оборудование и инструмент и т.д. На четвёртом уровне иерархии появляются уже отдельные экземпляры параметров (например, время и температура выпекания, квалификация рабочего, срок годности сырья, вязкость, твёрдость, толщина и цвет изделий, и т.д.).

На основе структуры цифрового двойника реализуется метод представления данных, где отдельные параметры являются структурными единицами цифровых двойников, на основе которых собирается информация для контроля технологических процессов (рис. 18) [8].



Рисунок 18 — Концептуальная структура α-ЦД и β-ЦД.

В поле «Параметр» для α-ЦД указывается наименование используемого параметра в соответствии с объектно-ориентированной структурой, которая была рассмотрена ранее (рис. 17).

Для каждого отдельного параметра в α -ЦД задаются поля допуска, единицы измерений, времени получения значения (от начала выполнения операции), источник данных и тип контроля.

Поле допуска содержит интервал, определяющий диапазон значений, которые может принимать данный параметр или ресурс технологического процесса. Каждый допуск может обозначаться в формате численных или буквенных значений. При использовании численных значений их размерность определяется по полю «Единица измерения», которое может быть пустым в случае использования безразмерной величины.

Допуск параметра может быть задан с помощью:

- единичного значения,
- нескольких допустимых значений,
- диапазона или нескольких диапазонов значений,
- диапазона или нескольких диапазонов значений с заданным шагом,
- текстового значения,
- ссылки (например, на базы данных с ресурсами технологических процессов).

Время получения значения определяется диапазоном значений в формате даты и/или времени, в течение которого должно быть введено значение параметра в систему контроля технологических процессов. Кроме диапазона время получения значения может быть задано с помощью конкретного времени, до которого оно должно быть получено.

Под источником данных понимается лицо или система, которые должны будут внести значение параметра или ресурса каждого технологического процесса в соответствующее поле значений β -ЦД. Поле «время получения значения» содержит диапазон временных значений, который определяет, в какой момент времени от начала операции должны быть получены значения параметра или ресурса технологического процесса. В поле «контроль параметра» указывается тип контроля для системы контроля технологических процессов, которая анализирует только контролируемые параметры.

В начале реализации технологического процесса для каждого изделия создаётся β -ЦД на основе α -ЦД и дополняется полями, которые служат для реализации функции контроля и фиксации значений параметров и ресурсов технологического процесса, поэтому β -ЦД включает дополнительные поля, содержащие значения фиксируемых параметров и ресурсов технологического процесса, время их получения, номер выполняемой операции, а также поле с информацией о том, кто фактически внёс данные значения.

Поле «значения параметра» содержит численные или текстовые значения параметров технологического процесса. Поле с номером операции содержит её идентификационный номер с целью поддержания логической связи параметра и ресурса технологического процесса с тем, на какой операции он был получен.

Поле «автор» содержит информацию о том, кто внёс значения и атрибуты параметра или ресурса технологического процесса. Этим автором может являться либо человек (например, мастер цеха, оператор, рабочий, технолог цеха, начальник цеха и т.д.), либо система (например, операционное оборудование, станки с числовым программным управлением, дополнительные измерительные системы, системы управления верхнего уровня и т.д.).

Описав структуру цифрового двойника технологического процесса, следует сказать об его отличиях от описания технологического процесса, которое может быть выполнено на цифровых и бумажных носителях в форме документов, чертежей и т.д. Под технологическим процессом понимается [106, с. 10] часть производственного процесса, содержащая целенаправленные действия по изменению и последующему определению состояния предмета производства. Технологический процесс разбивается на стадии, вспомогательные и основные операции и т.д., привязанные к рабочим местам.

Проектирование технологического процесса включает этапы назначения макро и микропараметров качества выпускаемых изделий, а в результате выполнения этих этапов и календарного планирования осуществляется рациональная организация производственного процесса [106, с. 133].

Таким образом, технологический процесс включает требования того, как должна быть изготовлена партия изделий пищевого производства и какими характеристиками должна обладать. Все эти параметры отражены в соответствующей документации [221]: технические условия, стандарт организации, государственный стандарт, программы анализа рисков и критических точек контроля, стандарты менеджмента безопасности пищевой продукции и т.д., — а их совокупность образует множество параметров технологического процесса, его ресурсного обеспечения и показателей качества выпускаемых изделий.

Каждый параметр технологического процесса формируется на основе четырёхуровневой иерархической структуры, состоящей из класса и подклассов. Каждый параметр технологического процесса принадлежит

одному классу и одному подклассу на каждом уровне структуры. Таким образом, имя параметра технологического процесса является уникальным полем и содержит его полное название, включающее названия всех уровней структуры: класса и четырёх уровней структуры [115].

Например, полное имя параметра технологического процесса, характеризующее общее время (параметр временных затрат) выполнения технологического процесса с номером 312, маршрутом 3 будет выглядеть следующим образом: «TP-312 / ROUTE-3 / SEQ_OP-2 / Total_time» (табл. 14).

Таблица 14 — Пример реализации метода представления параметра технологического процесса на основе предложенной структуры цифрового двойника.

Уровни структуры	Класс	Подклассы		
	1	2	3	4
Полное имя параметра ТП	TP-312	ROUTE-3	SEQ_OP-2	TOTAL_TIME
Расшифровка названий	Название ТП	Маршрут	Временные затраты	Общее время

Среди параметров технологических процессов выделяются контролируемые и неконтролируемые. Контролируемые параметры технологических процессов будем называть ключевыми, т.к. они прямым образом влияют на качество производимых изделий и определяются технологом с необходимой точностью. Цифровой двойник технологического процесса состоит не только из них, но именно они используются при контроле технологических процессов для операций сравнения. Для неконтролируемых параметров допуски могут быть не заданы (рис. 19).

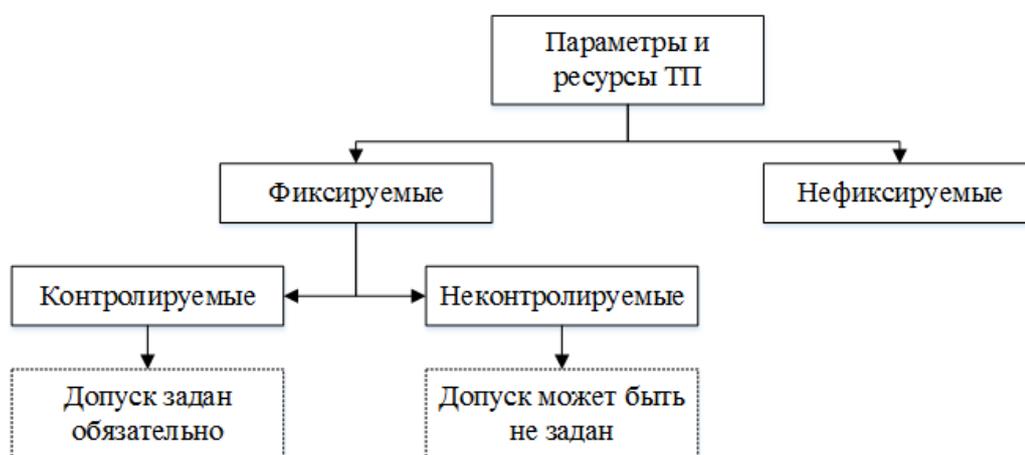


Рисунок 19 — Виды параметров и ресурсного обеспечения технологических процессов.

В процессе проектирования α -ЦД технолог рассматривает множество параметров каждого технологического процесса и их ресурсов, которые можно разделить на несколько групп. Все параметры технологического процесса и его ресурсного обеспечения можно разделить на фиксируемые и нефиксируемые. Нефиксируемые параметры не используются в разрабатываемой системе контроля технологических процессов в отличие от фиксируемых. Среди фиксируемых параметров выбираются контролируемые (ключевые), значительно влияющие на качество выпускаемых изделий, по мнению технолога, для которых он должен задать допуск, а для неконтролируемых фиксируемых параметров допуск может быть не задан, так как их влияние на качество считается разработчиками технологического процесса незначимым, а, следовательно, в их контроле нет большой необходимости.

Соответствующие значения также должны получить фиксируемые в процессе обработки параметры, среди которых выделяются контролируемые и неконтролируемые.

Цифровой двойник технологического процесса, как было показано ранее, является информационно-логической структурой, содержащей фиксируемые в процессе контроля параметры технологического процесса и его ресурсного обеспечения, которые могут иметь математические связи между собой и могут иметь ссылки на элементы цифрового производства (базы данных, производственные системы, оборудование, станки и пр.).

Так как эти параметры цифрового двойника технологического процесса представлены в структурированном цифровом формате, то, в отличие от технологического процесса с таким цифровым двойником удобнее совершать действия модификации, поиска, хранения, анализа, а контроль технологических процессов может реализовываться эффективнее за счёт возможности автоматизации отдельных процедур.

Анализ данных при использовании цифровых двойников технологических процессов может становится эффективнее, так как появляется возможность сопоставления значений параметров технологического процесса и его ресурсного обеспечения с их допусками в режиме реального времени, что делает возможным оперативное реагирование и выработку управляющих воздействий со стороны оператора или управляющих автоматизированных систем.

Таким образом, можно говорить о том, что цифровой двойник технологического процесса может использоваться системой контроля технологических процессов как отдельный инструмент моделирования и управления производством, позволяющий повышать как эффективность контроля технологических процессов, так и всего производства за счёт цифровизации процессов и, что самое главное, снижать уровень влияния человеческого фактора на качество выпускаемых изделий.

Обобщая вышесказанное, можно выделить следующие отличия разрабатываемого цифрового двойника от технологического процесса:

- цифровой двойник технологического процесса является информационно-логической структурой;
- цифровой двойник включает фиксируемые параметры технологического процесса, его ресурсного обеспечения и показателей качества, представленные в структурированном виде;
- цифровой двойник позволяет осуществлять контроль технологического процесса в режиме реального времени;
- цифровой двойник технологического процесса может функционировать как отдельный элемент управления производством.

2.3 Метод определения цифрового двойника технологического процесса

После создания цифрового двойника необходимо выполнить его определение. До начала выполнения заказа осуществляется настройка оборудования, и могут быть выпущены опытные образцы или тестовая партия для демонстрации заказчику и проверки работоспособности систем и корректности разработанной документации. В результате выполнения этого этапа могут быть выработаны рекомендации по изменению технологического процесса и его двойников. В случае целесообразности реализации этих мероприятий, выполняются необходимые операции модификации цифровых двойников.

Перед началом выполнения контроля технологических процессов должны выполняться следующие условия:

- Должен быть сформирован и определён α -ЦД, необходимый для реализации планируемого к реализации технологического процесса, и передан на хранение в архив.
- В α -ЦД технологом должны быть определены фиксируемые параметры.

— Все элементы производственной среды, которые будут задействованы в контроле технологических процессов, должны быть включены в систему обмена данными (архивы, базы данных, системы и пр.), а для персонала должен быть проведён инструктаж.

Цифровые двойники, используемые в разрабатываемой системе контроля технологических процессов, могут иметь разные степени определённости. Под неопределённым цифровым двойником технологического процесса (НО) будем понимать такой цифровой двойник, в котором не задан ни один параметр технологического процесса; под определённым цифровым двойником технологического процесса (О) будем называть такой цифровой двойник, в котором задан хотя бы один параметр технологического процесса; а полностью определённым цифровым двойником технологического процесса (ПО) будем называть цифровой двойник, в котором присутствуют все значения параметров технологических процессов, либо в их получении отказано в процессе контроля технологических процессов.

Таким образом реализуется метод определения цифровых двойников, при котором можно отследить, как меняются степени определённости цифровых двойников технологических процессов на разных стадиях их жизненного цикла и разных этапах контроля технологических процессов (табл. 15).

Состояние цифрового двойника по степени его определённости указано на момент начала конкретного этапа его жизненного цикла и контроля технологических процессов.

Таблица 15 — Метод определения цифровых двойников технологических процессов на разных стадиях жизненного цикла.

Стадии жизненного цикла цифрового двойника технологического процесса		Разработка рецептуры	Проектирование	Производство			Завершение заказа	Эксплуатация – возобновление
				I	II	III		
Этапы контроля технологического процесса		—		I	II	III	IV	—
Цифровые двойники	α-ЦД	НО		О			ПО	
	β-ЦД	НО			О		ПО	

В качестве этапов контроля технологических процессов понимается четыре этапа подготовки, сбора и анализа производственных данных: создание цифровых двойников для проведения контроля технологических процессов, фиксация параметров, ресурсное доопределение технологических процессов, анализ полученных значений. Контроль технологических процессов на основе их цифровых двойников проводится в пределах реализации технологических процессов до этапа завершения заказа.

Особенностью α -ЦД является то, что он не полностью определён на всех стадиях производства, так как не привязан к реализуемому в данный момент времени конкретному технологическому процессу, поэтому при разработке α -ЦД технолог обязан заполнить только поле имени параметра технологических процессов, а остальные поля не являются обязательными. Необходимость обязательного задания имени параметра обусловлена тем, что данное поле является уникальным и основным для реализации процесса контроля технологических процессов, а другие поля могут быть определены позже, например, при запуске технологического процесса, в процессе его реализации, либо вообще могут быть оставлены без изменений и быть пустыми.

2.4 Математическая модель системы контроля технологических процессов производства вафель

В настоящей работе предлагается использование двойника-эталона технологического процесса (α -ЦД) и множества двойников процессов производства изделий (β -ЦД), на основе которых будет решаться задача контроля технологического процесса. β -ЦД является цифровой копией реализованного технологического процесса обработки партии изделий. В дальнейшем после успешной разработки и внедрения этой системы производитель, исходя из требований к качеству выпускаемых изделий, может решать самостоятельно, насколько точной моделью будет двойник β -ЦД, т.е. на основе какого объёма данных он будет формироваться. Ввиду того, что разрабатываемая система контроля технологического процесса предназначается для применения в условиях многорецептурного пищевого производства, то необходимо принять следующее ограничение: одной партии произведённых изделий соответствует один цифровой двойник.

В данной работе рассматривается многорецептурное пищевое производство, поэтому на таком производстве может реализовываться несколько технологических процессов. Для каждого технологического процесса технологами формируются сначала α -ЦД, а затем в процессе

производства создаются β -ЦД для каждой партии изделий. Таким образом, при реализации производственных процессов система контроля технологических процессов оперирует наборами α -ЦД и β -ЦД, что может быть описано методами теории множеств для уточнения типа их отображения друг на друга.

Представим технологический процесс, α -ЦД и β -ЦД в виде трёх множеств. Выделение технологического процесса, как отдельного множества обусловлено тесной его связью с используемыми наборами цифровых двойников.

Ранее было показано, что α -ЦД формируется на основе технологического процесса, а β -ЦД — путём копирования соответствующего α -ЦД, следовательно, можно утверждать, что между ними существует связь, которую можно называть отображением.

Рассматриваемые в данной работе многорецептурные пищевые производства характеризуются тем, что они выпускают большую номенклатуру изделий, следовательно, на них реализуется большее число технологических процессов. Бóльшее число технологических процессов вынуждает применять на таких производствах бóльшее число цифровых двойников и, соответственно, возникает бóльшее число связей между парами двойников α -ЦД и β -ЦД, и исходным технологическим процессом.

Группе или одному β -ЦД в зависимости от требований к контролю технологических процессов, можно поставить в соответствие только один α -ЦД, при этом это соответствие будет охвачено правилом связи с одним технологическим процессом, что позволяет говорить о существовании соответствий между элементами множеств технологических процессов, α -ЦД и β -ЦД.

Обозначим множество α -ЦД A , β -ЦД — B , а технологический процесс — Γ . Положим, что для этих множеств существует два отображения:

1. Отображение f_1 из множества A во множество Γ , при котором каждому элементу α из множества A ставится в соответствие единственный элемент γ из множества Γ (1). Элемент γ является образом элемента α , т.е.:

$$f_1: A \rightarrow \Gamma, f_1(\alpha) = \gamma, \quad (1)$$

где

$$\Gamma(\gamma^{(1)}, \gamma^{(2)} \dots \gamma^{(l)}),$$

$$A = \{\alpha^{1(l)}; \alpha^{2(l)}; \dots; \alpha^{k(l)}\},$$

$$k \in N - \text{номер } \alpha\text{-ЦД},$$

$l \in N$ — номер технологического процесса.

2. Отображение f_2 из множества В на множество А, при котором каждому элементу β из множества В ставится в соответствие единственный элемент α из множества А (2). Элемент α является образом элемента β , т.е.:

$$f_2: B \rightarrow A, f_2(\beta) = \alpha, \quad (2)$$

где

$$B = \{\beta_1^{1(l)}; \beta_2^{1(l)}; \dots; \beta_n^{1(l)}; \beta_1^{2(l)}; \dots; \beta_n^{2(l)}; \dots; \beta_n^{k(l)}\},$$

где $n \in N$ – номер β -ЦД (номер изделия).

Оба отображения имеют одинаковые свойства, но ввиду работы с информационными структурами, их нельзя назвать равными (рис. 20), т.е. не выполняется условия:

$$A = B = \Gamma, \\ (\forall \beta \in B) \Rightarrow (f_1(\beta) = f_2(\alpha)).$$

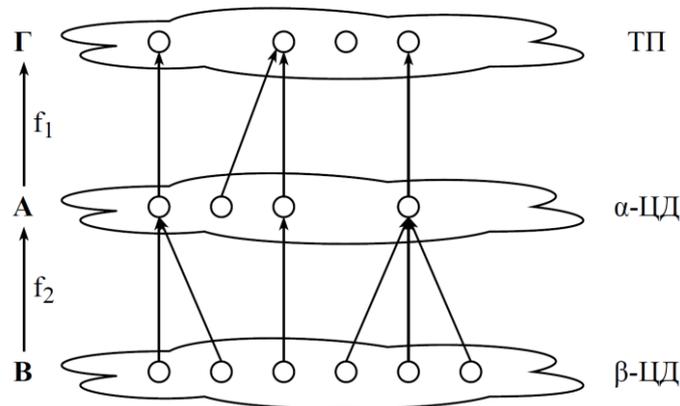


Рисунок 20 — Отображение множеств цифровых двойников и технологических процессов.

Отображения f_1 и f_2 не являются инъекцией, сюръекцией и биекцией, так как и технологический процесс и α -ЦД могут не иметь отображений на себя, т.е. могут не использоваться для создания соответственно α -ЦД и β -ЦД.

Инъективность отображений нарушена, так как любые два различных элемента из В имеют образы при отображении на два различных элемента из А; аналогично для f_1 , любые два элемента из А не имеют двух образов из Γ , т.е.

$$(\forall \alpha, \alpha' \in A): (\alpha \neq \alpha') \not\Rightarrow (f_1(\alpha) \neq f_1(\alpha')), \\ (\forall \beta, \beta' \in B): (\beta \neq \beta') \not\Rightarrow (f_2(\beta) \neq f_2(\beta')).$$

Отображения f_1 и f_2 не является сюръективным, так как, каждый элемент из А является образом при отображении f_2 более одного элемента из В, а для f_1 аналогично:

$$(\forall \gamma \in \Gamma)(\exists \alpha \in A): \gamma \neq f_1(\alpha),$$

$$(\forall \alpha \in A)(\exists \beta \in B): \alpha \neq f_2(\beta).$$

Рассматриваемые отображения могли быть сюръективным, но ввиду возможности наличия экспериментальных технологических процессов и различных версий α -ЦД, отменённых заказов и прочих причин, это может создать дополнительные ограничения системы, иными словами, может существовать α -ЦД, с которым не связан ни один β -ЦД или технологический процесс, не связанный ни с одним α -ЦД. Также данные отображения не являются биекцией по причине их несюръективности и неинъективности.

Проиллюстрировать приведённые математические обозначения можно следующим образом. Пусть на предприятие поступил заказ, и технологом был разработан, например, технологический процесс № 8, а для него создан α -ЦД № 1. На основе данных технологического процесса и α -ЦД выпустили две партии изделий, следовательно были сформированы два β -ЦД, т.е. существуют следующие соответствия по отображениям f_1 и f_2 :

$$f_1(\alpha^{1(8)}) = \gamma^{(8)},$$

$$f_2(\beta_1^{1(8)}) = \alpha^{1(8)},$$

$$f_2(\beta_2^{1(8)}) = \alpha^{1(8)}.$$

Пусть через пару месяцев состоялись переговоры о выпуске новой партии изделий по тому же технологическому процессу, а завод решил действовать на упреждение, и технологи модифицировали α -ЦД, чтобы быстрее запустить производство, но переговоры не увенчались успехом и новый α -ЦД не потребовался. Однако уже в следующем месяце удалось договориться, но из-за изменившихся производственных условий пришлось снова модифицировать α -ЦД, а затем по нему выпускать одно изделие, тогда возникнут новые соответствия:

$$f_1(\alpha^{2(8)}) = \gamma^{(8)},$$

$$f_1(\alpha^{3(8)}) = \gamma^{(8)},$$

$$f_2(\beta_1^{3(8)}) = \alpha^{1(8)}.$$

Для дальнейшей работы необходимо обозначить Δ множество параметров технологического процесса, хранящихся в его цифровом двойнике. Для этого множества будет существовать два отображения:

1. Отображение f_3 из множества Δ во множество A , при котором каждому элементу δ из множества Δ ставится в соответствие единственный элемент α из множества A (3). Элемент α является образом элемента δ , т.е.:

$$f_3: \Delta \rightarrow A, f_3(\delta) = \alpha, \quad (3)$$

где

$$\Delta(\delta_1, \delta_2 \dots \delta_m),$$

$m \in N$ — номер параметра цифрового двойника технологического процесса.

2. Отображение f_4 из множества Δ во множество B , при котором каждому элементу δ из множества Δ ставится в соответствие единственный элемент β из множества B (4). Элемент β является образом элемента δ , т.е.:

$$f_4: \Delta \rightarrow B, f_4(\delta) = \beta. \quad (4)$$

3. Отображение f_5 из множества Δ во множество Γ , при котором каждому элементу δ из множества Δ ставится в соответствие единственный элемент γ из множества Γ (5). Элемент γ является образом элемента δ , т.е.:

$$f_5: \Delta \rightarrow \Gamma, f_5(\delta) = \gamma. \quad (5)$$

Отображения f_3 , f_4 и f_5 сюръективны, так как каждому набору параметров обязательно соответствует свой технологический процесс и α -ЦД, а при наличии изготовленной продукции — β -ЦД (рис. 21):

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

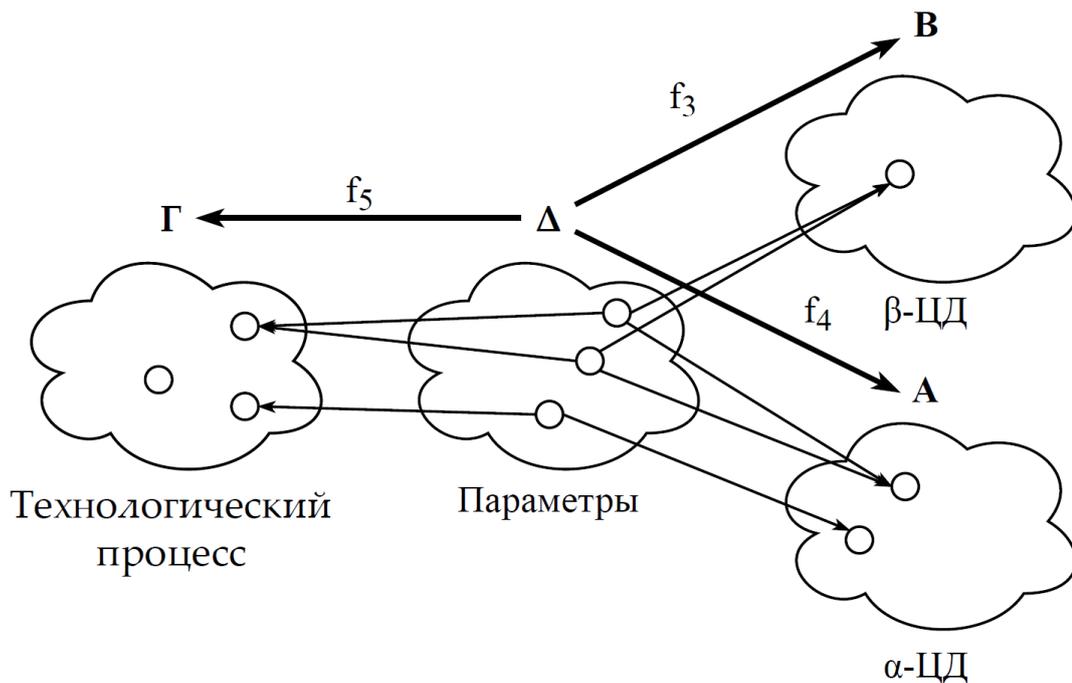


Рисунок 21 — Отображения множества параметров контроля технологического процесса.

Таким образом, проектируемую систему контроля технологических процессов и их ресурсного обеспечения можно представить в виде отображений множеств двойников, процессов и параметров. Комбинация из пяти видов отображений множеств, описанных выше образуют математическую модель проектируемой информационной системы контроля технологических процессов.

Данная математическая модель является основой для разработки информационной модели и модели данных проектируемой системы контроля технологических процессов с расчётом необходимого объёма для хранения данных, так как показывает связность параметров, двойников и процессов, чем определяет структуру предлагаемой в данной работе концепции контроля технологических процессов.

2.5 Разработка структурно-параметрических и математических моделей основных стадий производства вафель

Сформировав основу в виде методики контроля технологических процессов производства вафель, которая обеспечивает пользователя большим объёмом систематизированных данных в форме экземпляров цифровых двойников, можно перейти к решению задачи управления. Эта задача может быть решена с помощью структурно-параметрических моделей основных стадий производства вафель, обеспечивающих математическую формализацию связей входных, управляемых, контролируемых и выходных параметров с возможностью поддержки принятия решений на основе данных моделей.

Разработка данных математических моделей была основана на экспериментальных исследованиях с выделением наиболее значимых факторов. Данные экспериментальных исследований были получены на кондитерском предприятии «Рот Фронт» в виде статистических данных, которые позволили выявить основные входные параметры и возмущающие факторы, влияющие на ход технологического процесса производства вафель. Основываясь на работе [21], выполним следующие этапы.

На начальном этапе разработки структурно-параметрических моделей были рассчитаны корреляционные связи, отражающие глубину статистической связи между параметрами на основе формулы (6):

$$r_{ij} = \frac{\frac{1}{n-1} \sum_{k=1}^n (\bar{x}_i - x_{ki})(\bar{x}_j - x_{kj})}{\sqrt{S_{x_i}^2} \sqrt{S_{x_j}^2}} \quad (6)$$

при $i = \overline{1, m-1}, i = \overline{i+1, m}, r_{ij} = r_{ji}$,

где r_{ij} — корреляционная связь между параметрами с индексами i и j ,

\bar{x}_i и \bar{x}_j — среднее значение параметров с индексами i и j ,

$S_{x_i}^2$ и $S_{x_j}^2$ — дисперсия параметров с индексами i и j .

Коэффициент корреляционной связи r_{ij} определялся по формуле критерия Стьюдента таким образом, что при $t_{ij} \geq t_{кр}$ коэффициент удовлетворял неравенству (7):

$$t_{ij} = \frac{r_{ij} \sqrt{n-2}}{\sqrt{1-r_{ij}^2}} > t_{кр}, \quad (7)$$

иначе r_{ij} принимался равным нулю.

Вторым шагом применялся метод регрессионного анализа для определения характера связей между параметрами. На втором шаге выделялись только группы параметров, обладающих сильной связью, и рассчитаны коэффициенты линейной множественной регрессии для каждого параметра (8):

$$x_i = p_{i0} + \sum_{j \neq 1}^m p_{ij} x_j \quad \text{при } i = \overline{1, n}, \quad (8)$$

где $p_{i0}, p_{i1}, p_{i2}, \dots, p_{im}$ — коэффициенты связи параметров с индексами i и j ($j = \overline{1, m}$).

Коэффициенты регрессии были рассчитаны на основе метода наименьших квадратов в соответствии с журналом наблюдений контролируемых параметров в n опытах ($k = \overline{1, n}$) (9):

$$R(\vec{p}) = \sum_{k=1}^n (x_k - \bar{x}_k)^2 \rightarrow \min. \quad (9)$$

Для реализации метода минимизации проводился поиск минимального значения отклонений квадратов от рассматриваемого показателя в регрессионной модели. Рассмотрев приращения строк корреляционной матрицы, можно получить (10):

$$\Delta x_i = \sum_{k=1}^n p_{ij} \Delta x_j \quad \text{при } i = \overline{1, m}, \quad (10)$$

где m_i — число факторов для каждого Δx_j с сильной корреляционной связью с отклонением Δx_i .

В нашем случае опыты проводились однократно, поэтому поиск коэффициентов множественной регрессии

$$y = p_0 + \sum_{j=1}^n p_j$$

можно выполнить по формуле, включающей в себя расчёт коэффициентов системы уравнений (11) в виде массивов (12 и 13):

$$\sum_{k=1}^n \sum_{j=0}^{m_i} p_j x_{kj} x_{ki} = \sum_{k=1}^n y_k x_{ki} \text{ при } i = \overline{0, m_i}, \quad (11)$$

$$a_{ij} = \sum_{k=1}^n x_{kj} x_{ki} \text{ при } i, j = \overline{0, m}, \quad (12)$$

$$b_i = \sum_{k=1}^n y_k x_{ki} \text{ при } i = \overline{0, m}. \quad (13)$$

Выполнив замену в (11), получим систему уравнений:

$$\sum_{j=0}^m p_j a_{ij} = b_i \text{ при } i = \overline{0, m_i},$$

которая решается относительно неизвестных коэффициентов p_j при $j = \overline{0, m}$ методом Гаусса-Жордана [42, 43].

Рассчитанные значения ранее неизвестных коэффициентов

$$p_j = a_{j, m+1} \text{ при } j = \overline{0, m}$$

были подвергнуты проверке на адекватность по критерию Фишера (14):

$$F = \frac{S_y^2}{S_{ad}^2}. \quad (14)$$

где

$$S_y^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{k=1}^n (\bar{Y} - y_k)^2,$$

$$S_{ad}^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{k=1}^n \left(\sum_{j=1}^m p_j x_{kj} - y_k \right)^2.$$

Возможность сравнения влияния параметров разной физической природы и размерностей между друг другом была обеспечена переходом от матриц размерных коэффициентов p_{ij} к матрице безразмерных относительных характеристик связей.

Поэтому далее в формуле связи (10) были рассмотрены относительные величины $\Delta x_i^* = \frac{\Delta x_i}{\Delta x_i^0}$ в долях от допустимых отклонений Δx_i^0 или относительного среднеквадратичного отклонения (15):

$$\Delta x_i^* = \frac{x_i - \bar{x}_i}{\sigma_{x_i}} = \frac{\Delta x_i}{\sigma_{x_i}}. \quad (15)$$

Следуя полученным выражениям, можно преобразовать исходное уравнение регрессии (16):

$$\sigma_{x_i} \Delta x_i^* = \sum_{\substack{i=1 \\ j \neq 1}}^n p_{ij} \frac{\sigma_{x_j}}{\sigma_{x_i}}. \quad (16)$$

Наконец, можно получить искомые безразмерные коэффициенты построения математической структурно-параметрической модели зависимостей параметров при производстве вафель.

Основываясь на полученных математических уравнениях, последовательно получим структурно-параметрические модели для каждой стадии производства вафель.

Следуя из полученных выше математических уравнений и проведённых расчётов, были определены входные (стрелка слева), регулируемые (стрелка сверху) и контролируемые (стрелка снизу) параметры (табл. 1), влияющие на выходные (табл. 8). Эти выходные параметры определены исходя из удобства использования в будущей подсистеме поддержки принятия решений, задача которой показать возможность осуществления контроля параметров технологических процессов производства вафель, где более подробно рассматривалась стадия выпечки и подготовки эмульсии.

Результаты структурно-параметрического моделирования процесса приготовления эмульсии представлены в табл. 16, где главной задачей являлся поиск характеристик связей между параметрами технологического процесса для разработки в дальнейшем подсистемы поддержки принятия решений. Для получения структурно-параметрических и математических моделей были получены следующие матрицы.

1. Корреляционная таблица связей параметров R_{ij} , где значения были подвергнуты проверке значимости по критерию Стьюдента, а другие значения были заранее приравнены к нулю из-за их малой степени влияния.

2. Матрица коэффициентов регрессии, которая была преобразована в матрицу безразмерных характеристик связей.

Таблица 16 — Сводная таблица построения структурно-параметрических и математических моделей стадий технологического процесса производства вафель.

№ п/п	Структурно-параметрическая модель	Математическая модель
1.		$Y_1 = 0,68X_1 + 0,75X_6 + 0,24X_8$
2.		$Y_2 = 0,54X_8 + 0,75X_{22} + 0,89X_{23}$
3.		$Y_3 = 0,84X_3 + 0,95X_{11}$
4.		$Y_4 = -0,63X_6 + 0,79X_{19}$
5.		$Y_5 = 0,88X_{20} - 0,54X_{22} + 0,65X_{24} - 0,43X_{25}$
6.		$Y_6 = 0,91Y_3 + 0,69X_{27}$
7.		$Y_7 = 0,84Y_6 + 0,44X_{28}$

2.6 Алгоритмы фиксации параметров и определения ресурсов при контроле технологических процессов

На этапе выполнения контроля технологических процессов выполняется создание и доопределение β -ЦД, поэтому при проектировании и в начале производства данный цифровой двойник не определён, а затем он уже подвергается определению и по завершению производства изделий β -ЦД становится полностью определённым.

Предполагается, что изначально в разрабатываемой системе контроля технологических процессов будет содержаться база основных параметров технологических процессов, которую технолог может использовать для проектирования технологических процессов. Если потребуется вести контроль какого-либо другого параметра технологического процесса, то он может быть добавлен в данную систему вручную путём создания нового объекта структуры или модифицирования изначально имеющегося подкласса параметров.

В рамках данной работы рассматриваются вопросы применения β -ЦД для решения задачи контроля технологических процессов, а α -ЦД уже считается сформированным и данным в качестве исходной модели технологического процесса.

Перед началом производства система контроля технологических процессов загружает α -ЦД из архива (рис. 22). В случае, если такой α -ЦД не найден или его структура некорректна, то система контроля технологических процессов останавливает свою работу с ошибкой.

Корректность α -ЦД определяется на основе соблюдения следующих критериев:

- уникальность имён параметров технологического процесса;
- наличие допусков и источников данных у контролируемых параметров технологического процесса (является полностью определённым);
- является последней версией.

Ошибки в структуре определяются на основе формальных правил целостности файла, содержащего α -ЦД. Эта целостность определяется на основе возможности открытия и чтения файла и корректности интерпретации структуры (определения полей цифровых двойников, чтения их значений и т.д.).

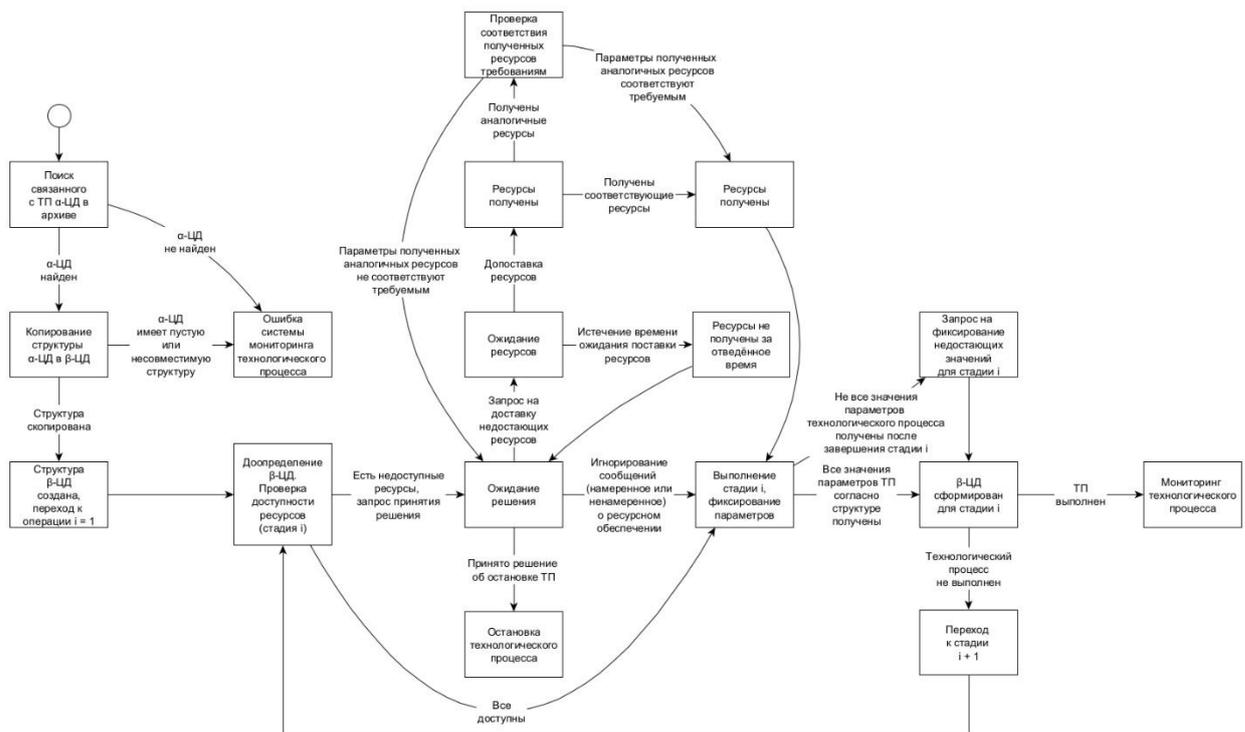


Рисунок 22 — Алгоритмы применения β -ЦД для контроля технологических процессов.

Уникальность имён параметров технологических процессов определяется на основе выполнения процедуры сравнения их названий друг с другом в загружаемом наборе из цифровых двойников.

У всех контролируемых параметров технологических процессов проверяется наличие допусков и источников получения данных для последующей реализации контроля.

Кроме ошибок разрабатываемая система контроля технологических процессов может предупреждать пользователя с помощью информационных сообщений, а он сам может пренебречь этими сообщениями системы ввиду, например, их невысокой степени влияния на качество выпускаемых изделий.

Загрузка α -ЦД осуществляется из архива долговременного хранения в систему контроля технологических процессов для обеспечения возможности оперативного доступа.

После осуществления всех процедур проверок при их успешности система контроля копирует структуру α -ЦД в создаваемый β -ЦД, осуществляет дополнение недостающими полями цифровой двойник и переходит к первой технологической стадии (операции).

После копирования структуры α -ЦД в β -ЦД начинается итерационный процесс контроля технологического процесса для всех стадий изготовления партии изделий, каждый цикл которого можно разделить на две части:

ресурсное доопределение и фиксирование параметров технологических процессов для β -ЦД.

На этапе ресурсного доопределения осуществляется наполнение β -ЦД данными о ресурсах цеха, которые будут использованы для реализации стадий технологического процесса. На этом этапе возможно возникновение следующих ситуаций:

1. Если все ресурсы доступны в соответствии с требованиями технолога, которые он отразил в загруженной структуре α -ЦД, то осуществляется переход к стадии фиксирования параметров ресурсного обеспечения технологического процесса.
2. Если некоторые ресурсы недоступны, но могут быть допоставлены, то данное действие запрашивается со склада оператором.
3. Если некоторые ресурсы недоступны и незначимы, то оператор игнорирует требование системы контроля технологических процессов.
4. Если некоторые ресурсы недоступны, значимы и их допоставка невозможна, то оператор останавливает технологический процесс вместе с его системой контроля.

Можно заметить, что допоставка соответствующих или заменяющих ресурсов необходимого качества на участок проведения операции обработки должна быть реализована в отведённое время, а ответственное лицо должно подтвердить соответствие доставленных ресурсов требованиям технологического процесса, либо запросить новую поставку с целью устранения несоответствий параметров поставленных ресурсов.

Время ожидания определяется на основе специфики производства и зависит от уровня автоматизации предприятия, поэтому β -ЦД доступен для редактирования и доопределения в режиме реального времени в течение всей текущей операции по изготовлению партии изделий и до начала следующей, либо он полностью определяется перед началом операции в зависимости от её типа. Такой подход наиболее эффективен при высокоуровневой автоматизации стадий технологических процессов.

При использовании ресурсов в производстве изделий также могут возникать следующие случаи (табл. 17):

1. Если используемый ресурс полностью удовлетворяет требованиям технолога, то выполнение операций продолжается в штатном режиме.

2. Если используемый ресурс не полностью удовлетворяет требованиям технолога, когда стадия остаётся ещё выполнимой, то оператор получает предупреждение об этом несоответствии и продолжение реализации технологического процесса возможно только под его ответственность.
3. Если используемый ресурс не удовлетворяет требованиям технолога, когда дальнейшая реализация технологического процесса невозможна, то оператору предлагается остановить технологический процесс.

Процесс фиксации параметров технологических процессов построен аналогичным образом: в течение операции обработки изделия и до начала следующей параметры технологических процессов фиксируются, а затем внесение данных в β -ЦД для данной операции запрещается.

Таблица 17 — Способы ресурсного доопределения в процессе контроля технологических процессов.

Тип ресурса	Способы ресурсного доопределения		
	соответствующий	допустимый	несоответствующий
Соотношение с допуском	удовлетворяет требованиям	допустим для операции	не допустим для операции
Коммуникация с оператором	без информирования	запрос на разрешение использования ресурса	предложение остановить технологический процесс

Процессы доопределения и фиксации должны быть максимально автоматизированы. Исходя из принципов построения предприятий в рамках концепции умного производства всё оборудование цеха, в котором применяется система контроля технологических процессов должно быть оцифровано. То есть, например, оператору или мастеру, достаточно знать инвентарный номер оборудования или устройства, чтобы получить все его показатели и характеристики.

Также система контроля технологических процессов в процессе её функционирования должна осуществлять предварительную подстановку значений полей «время получения» и «автор» в случае определения значения какого-либо параметра технологического процесса. При указании ссылок на базу данных возможна автоматическая подстановка значений в поля β -ЦД.

После выполнения каждой операции β -ЦД должен быть полностью определён, т.е. он должен обладать всеми значениями параметров технологических процессов и ресурсов согласно своей структуре.

Возможны случаи, когда те или иные значения не были получены вследствие различных причин. Неполнота данных о значениях параметров технологических процессов и о ресурсах в β -ЦД может возникнуть вследствие:

1. игнорирования предупреждений оператором или мастером цеха;
2. физической невозможности получить необходимую информацию согласно структуре β -ЦД;
3. некорректности структуры β -ЦД (ошибки технологического процесса, α -ЦД и пр.).

По завершению первых двух этапов сбора значений параметров технологического процесса и данных о ресурсах система считает операцию завершённой, цикл повторяется для следующей операции до завершения всего технологического процесса, после чего система его контроля выполняет анализ данных и составляется отчёт.

Когда все операции выполнены и технологический процесс производства партии завершён, то система предлагает возможность донесения значений параметров технологического процесса, а затем наступает этап анализа данных контроля технологического процесса.

На этом этапе выполняется контроль и сравнение параметров α -ЦД и β -ЦД с целью выдачи заключений о том, выполнен ли технологический процесс в соответствии с требованиями технолога или нет.

2.7 Выводы по главе 2

В ходе разработки комплекса методов и алгоритмов была предложена концептуальная модель контроля технологических процессов многорецептурного пищевого производства на основе применения двух типов связанных цифровых двойников α -ЦД и β -ЦД, выполняющая модификацию обеспечивающей подсистемы мониторинга АСУ ТП.

Предложенный комплекс методов и алгоритмов контроля технологических процессов представляет собой новый подход к проектированию информационного обеспечения систем управления технологическими процессами. Благодаря ему обеспечиваются необходимыми данными функции оперативного управления производством в режиме реального времени, а также функции модификации процессов и моделей.

В ходе проработки комплекса определены основные условия и требования для реализации системы контроля технологических процессов на основе технологии цифровых двойников, способствующие построению высокотехнологичного производства на основе автоматизированного сбора данных и их анализа.

Для описания главного принципа реализации предложенной концепции разработана математическая модель системы контроля технологических процессов, состоящая из набора отображений цифровых двойников, технологических процессов и параметров контроля, позволяющая выполнить разработку информационной модели проектируемой системы контроля технологических процессов.

Разработанные в данном разделе структурно-параметрические и математические модели для каждой стадии производства вафель являются основой для последующей разработки подсистемы поддержки принятия решений.

3 РАЗРАБОТКА МОДЕЛИ ИНФОРМАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ И МЕТОДИКИ КОНТРОЛЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ПРОИЗВОДСТВА ВАФЕЛЬ

3.1 Условия работы системы контроля технологических процессов производства вафель

Разработанная система контроля технологических процессов предназначена для работы на уровне цеха предприятий пищевого производства вафель, выпускающих широкую номенклатуру изделий. На основе этих условий возникает несколько внутрисистемных параллельных процессов контроля для каждого технологического процесса. С другой стороны, такие предприятия должны иметь высокий уровень автоматизации и цифровизации процессов, которые включают в себя использование цифровых двойников партий изделий, инструменты численного моделирования, аналитику и другие. Уровень цеха высокотехнологичного (умного) производства характеризуется организацией единого информационного пространства, где многие объекты представлены в цифровом виде и связаны для совместной работы над ними.

Для упрощения восприятия модель системы контроля изображена на диаграммах в нотациях структурно-функционального моделирования IDEF0, IDEF3 и DFD (рис. 23).

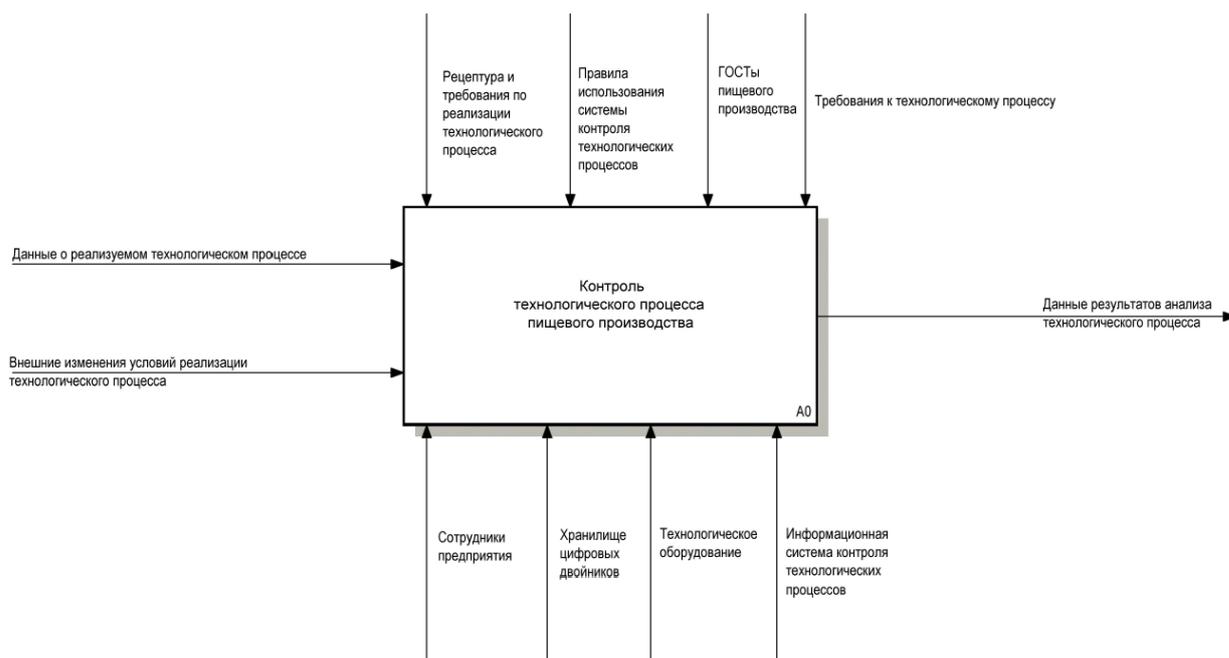


Рисунок 23 — Контекстная диаграмма функциональной модели системы контроля технологических процессов при производстве вафель.

Система контроля технологических процессов выполняет функцию сбора данных о реализации технологических процессов и осуществляет их первичный анализ (рис. 23). Кроме этого, данная система подвергается внешним воздействиям разного характера. Например, могут измениться условия реализации технологических процессов, условия рынка, состав выпускаемого изделия и т.д. Другим значимым результатом работы проектируемой системы является формируемый дополненный цифровой паспорт изделия.

Контроль технологических процессов осуществляется с помощью информационной системы, осуществляющей сбор и анализ данных, при непосредственном участии сотрудников предприятия и использовании технологического оборудования и хранилищ информации.

Обработка входных данных выполняется на основе ГОСТ (например, 24508-80, 18488-2000, 31987-2012, 33688-2015), рецептуры изготовления изделия, разработанных алгоритмов, которые описаны в данной главе, включающих требования, правила и процедуры контроля технологических процессов.

3.2 Применение системы контроля на разных этапах жизненных циклов цифровых двойников, изделий и технологических процессов

Следуя рис. 14, проектируемая система контроля может использоваться на всех этапах жизненных циклов изделий, технологических процессов и их цифровых двойников технологических процессов (рис. 24).

На этапе проектирования и подготовки производства автоматически создаётся α -ЦД, содержащий требования к реализации будущих технологических процессов. При запуске производства создаётся β -ЦД для каждой партии изделий и реализуются алгоритмы фиксации параметров и ресурсного определения.

После завершения производства изделий формируются логи и отчёты, на основе которых может быть реализован анализ данных потребления на основе информации от потребителей для изменения рецептуры, упаковки, параметров технологического процесса и цифровых двойников.

На этапе утилизации технологических процессов и после потребления изделий выполняется работа с цифровыми двойниками и их хранилищами, которые также могут быть удалены, архивированы для долгосрочного хранения с целью последующего использования и реализации методов модификации.

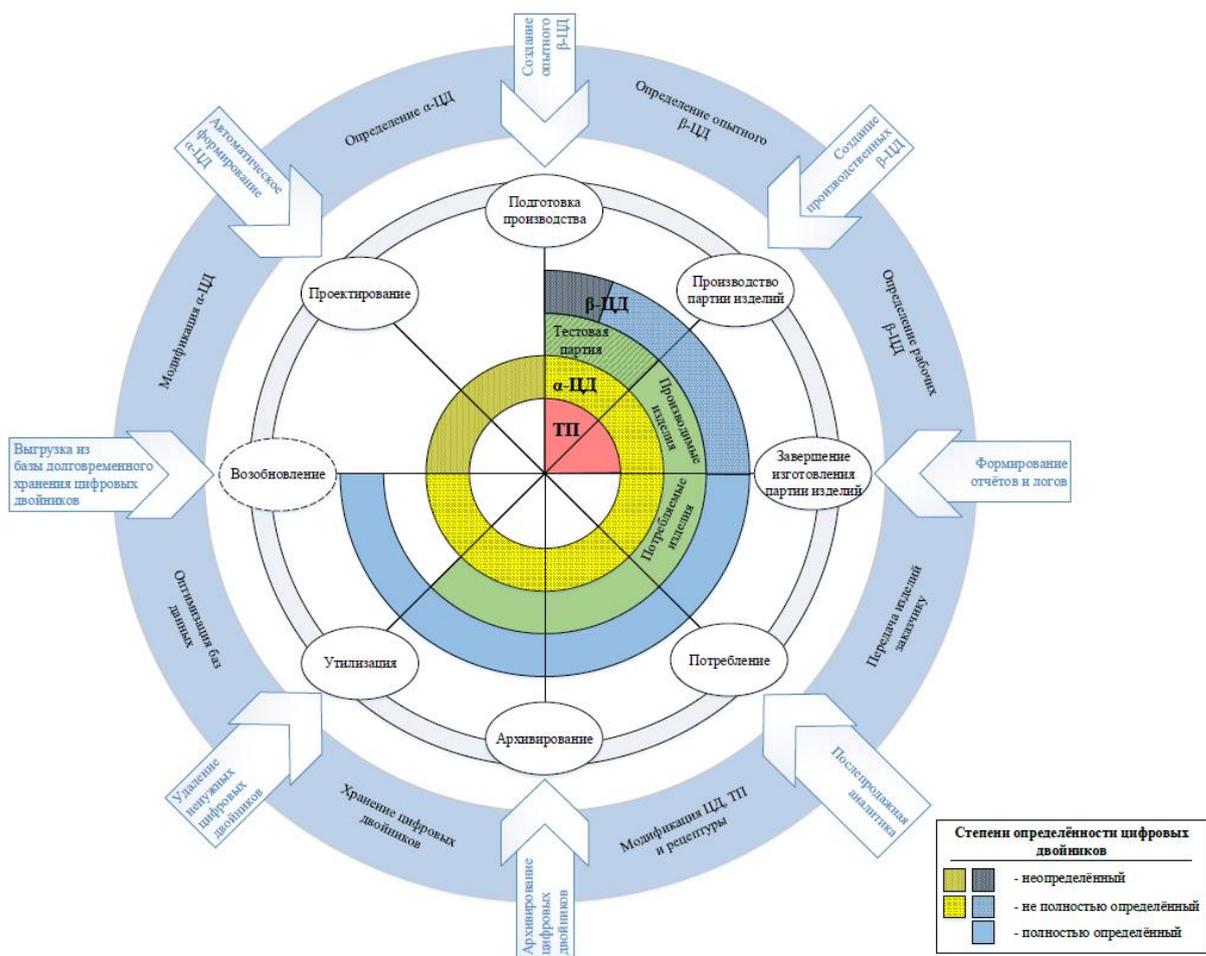


Рисунок 24 — Применение системы контроля на разных этапах жизненных циклов технологических процессов и их цифровых двойников.

3.3 Задача обеспечения режима реального времени при контроле технологических процессов

Одной из основных задач, которые решает предлагаемая методика контроля технологических процессов является реализуемое в режиме реального времени сравнение значений параметров этих процессов с требуемыми значениями в виде допусков, сформированных ранее технологом на этапе проектирования процесса обработки изделий. Задача обеспечения режима реального времени контроля технологических процессов решается через определение времени реакции системы контроля на отклонения значений параметров технологических процессов от заданных значений. Реакция системы контроля реализуется через выдачу информации для принятия необходимых решений оператором цеха на основе проведённого оперативного сравнительного анализа, которыми могут являться остановка или продолжение реализации технологического процесса.

В данной методике режим реального времени рассматривается не относительно операций обработки изделий, а относительно технологических процессов, при которых время реакции системы исчисляется минутами и часами. В таком случае режим реального времени реализуется через возможность реагирования системы контроля на изменение параметров технологических процессов сразу или до завершения изготовления детали.

При контроле технологических процессов скорость получения данных от производственных систем на порядки выше, чем выполнение операций, а система контроля технологических процессов не относится к системам автоматического управления, а получает уже обработанные данные и работает на среднем и верхнем уровне автоматизации.

Для оценки времени реакции системы необходимо определить временные затраты на получение, обработку и выдачу информационных сообщений об отклонениях для принятия решений. Для этого необходимо рассмотреть получение значений параметров технологических процессов:

- от пользователя (оператора, диспетчера и т.д.),
- от дополнительных измерительных систем (датчики, контрольно-измерительные приборы и пр.),
- от систем с ПЛК.

В случае ручной фиксации параметров пользователем должны рассматриваться следующие средние приблизительные значения временных параметров, полученные на основе средних значений реакции человека и требований к отклику системы [32]:

- время реакции человека: $t_{рч} = 150$ мс,
- время поиска незафиксированного автоматически параметра: $t_{рп} = 15$ с,
- среднее время ручной фиксации одного атрибута параметра: $t_{рф1} = 10$ с,
- среднее время ручной фиксации одного параметра: $t_{рф} = 230$ с,
- время использования (нажатие кнопок, использование выпадающих списков, элементов меню и пр.) сервисных кнопок при работе с системой контроля технологических процессов: $t_{рс} = 60$ с,
- время передачи параметра на сервер: $t_{п} = 1$ с,
- время обработки полученного значения параметра системой контроля технологических процессов и осуществления информирования оператора: $t_{о} = 1$ с.

Время реакции системы контроля при ручной фиксации параметра технологических процессов может оцениваться следующей формулой:

$$T_p = t_{рч} + t_{рп} + t_{рф} + t_{рс} + t_{п} + t_o,$$

где можно пренебречь $t_{рч}$, $t_{п}$, t_o из-за сравнительно малых оценочных значений, поэтому отсюда получим:

$$T_p \approx t_{рп} + t_{рф} + t_{рс},$$
$$T_p \approx 5 \text{ мин.}$$

В случае фиксации значений параметров с использованием датчиков в отличие от ручной фиксации оператором должны рассматриваться следующие отличные средние приблизительные значения временных параметров:

- время отклика датчика: $t_{до} = 1 \text{ с}$,
- время передачи и обработки данных датчика на первичном устройстве управления: $t_{дп} = 2 \text{ с}$.

Время реакции системы контроля технологических процессов при использовании датчиков может контролироваться следующей формулой:

$$T_d = t_{до} + t_{дп} + t_{п} + t_o,$$
$$T_d \approx 5 \text{ с.}$$

При использовании систем с ПЛК для фиксации значений параметров технологических процессов при их контроле ключевую роль играет время обработки запросов ($t_{ко}$) системой с ПЛК и передачи ответов ($t_{кп}$), который зависит от производителя этой системы и способа реализации информационного обмена. Время реакции системы контроля технологических процессов при использовании систем с ПЛК может оцениваться:

$$T_{ПЛК} = t_{ко} + t_{кп} + t_{п} + t_o,$$
$$T_{ПЛК} \approx 10 \text{ с.}$$

Таким образом, обеспечение режима реального времени определяется требованием к реакции системы контроля технологических процессов за 5 минут с момента ручной фиксации параметра и 10 с. при автоматической фиксации параметра.

3.4 Разработка структурно-функциональной модели системы контроля технологических процессов производства вафель

3.4.1 Концептуальная модель системы контроля технологических процессов

При декомпозиции верхнего уровня модели системы контроля технологических процессов можно выделить четыре основные функции:

загрузка и коррекция цифровых двойников, ресурсное определение и фиксация параметров, а также анализ данных процесса контроля (рис. 25).

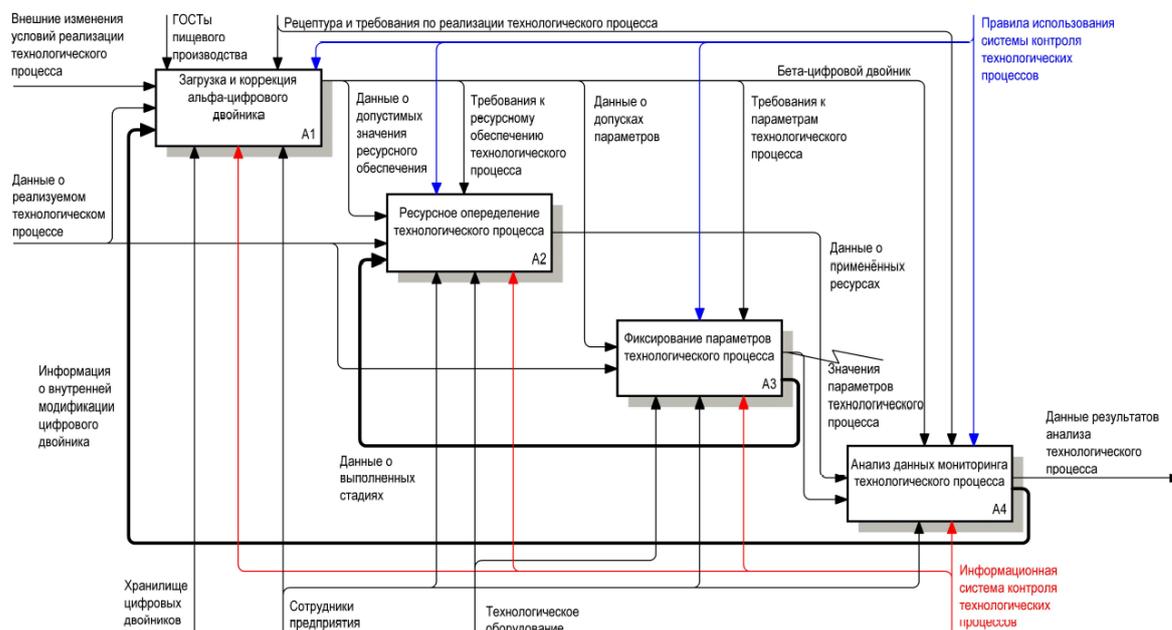


Рисунок 25 — Декомпозиция контекстной диаграммы функциональной модели контроля технологических процессов.

Функция загрузки и коррекции α -ЦД реализует загрузку в систему контроля требований к реализации технологического процесса и рецептуры и обеспечивает три другие функции соответственно требованиями к ресурсному обеспечению, допусками значений параметров и единым набором требований для выполнения анализа данных контроля в режиме реального времени и после завершения реализации технологического процесса. Рассматриваемая функция включает алгоритмы создания, внешней и внутренней модификации α -ЦД, процедуры взаимодействия с хранилищами оперативного и долговременного доступа к цифровым двойникам, обеспечивает проверку α -ЦД при его загрузке с преобразованием в β -ЦД, а также его доопределение перед выполнением технологического процесса (рис. 26). Выполнение всех алгоритмов и процедур выполняется сотрудниками предприятия или автоматизировано. При этом этап разработки цифровых двойников выполняется автоматизировано при разработке рецептуры и технологических процессов технологами, а все остальные — операторами цеха.

Алгоритмы ресурсного определения и фиксирования параметров технологического процесса в модели не связаны напрямую, однако на усмотрение оператора информация об используемых ресурсах может использоваться им и для отслеживания анализа фиксируемых параметров.

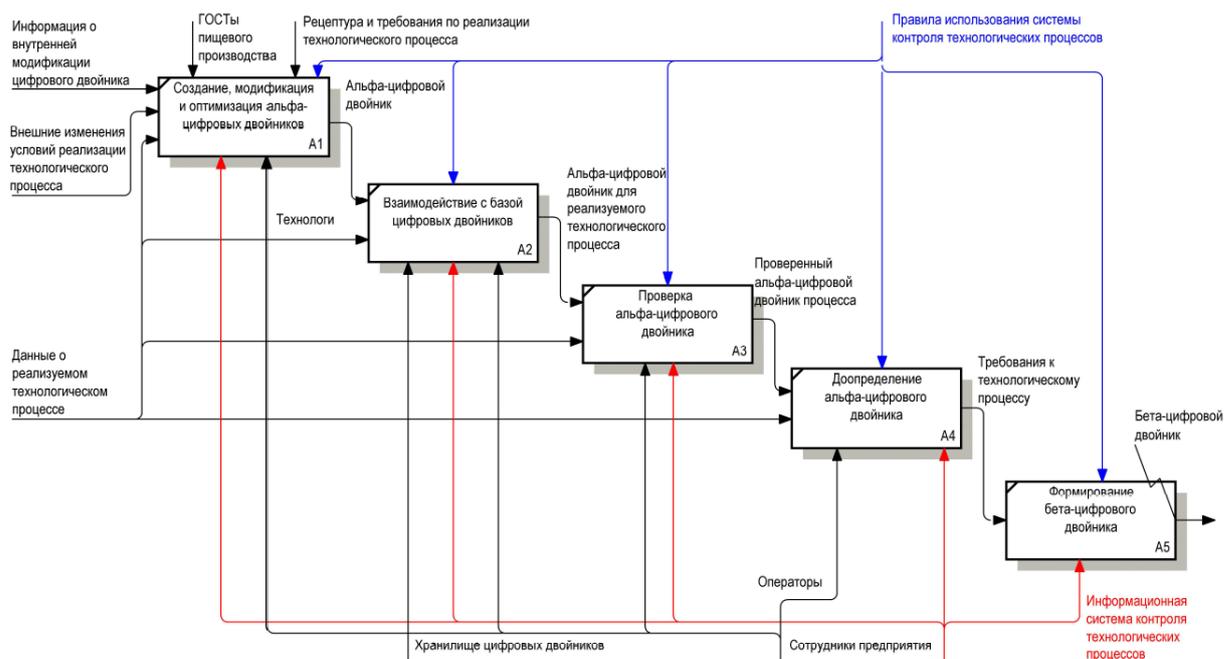


Рисунок 26 — Функциональная модель загрузки и коррекции α-ЦД.

Так особенности применённых ресурсов, которые также могут отличаться от предполагаемых технологом, способны влиять на фиксируемые параметры и вызывать отклонения, в том числе выходящие за границы допустимых значений, что в частных случаях может быть возможным и не повлечёт возникновение брака. Обе эти функции выполняются последовательно и охвачены обратной связью, которая реализует их перезапуск в том же порядке для каждой операции реализуемого технологического процесса, а также позволяет проводить идентификацию операций на основе заданного в цифровом двойнике технологического маршрута обработки изделия. Результатом выполнения этих функций являются собранные автоматически или вручную данные, передаваемые в функцию анализа в качестве входных данных.

Алгоритм ресурсного доопределения (рис. 27) предполагает получение данных о применяемых ресурсах и сопоставление с требованиями технолога. На основе этого сравнения в режиме реального времени оператор может формировать различные управленческие решения вплоть до остановки контроля и самого технологического процесса. В ходе реализации этой функции возможны допоставка ресурсов на основе проверки их доступности.

Алгоритм фиксирования параметров технологического процесса реализуется по тому же принципу, но в отличие от ресурсного доопределения, выполняется уже параллельно процессу обработки изделия или непосредственно после него, а также возможна дополнительная фиксация

параметров. Аналогично при этом может возникать необходимость принятия оператором управленческих решений на основе сравнения допусков (требований) к параметрам и полученных значений.

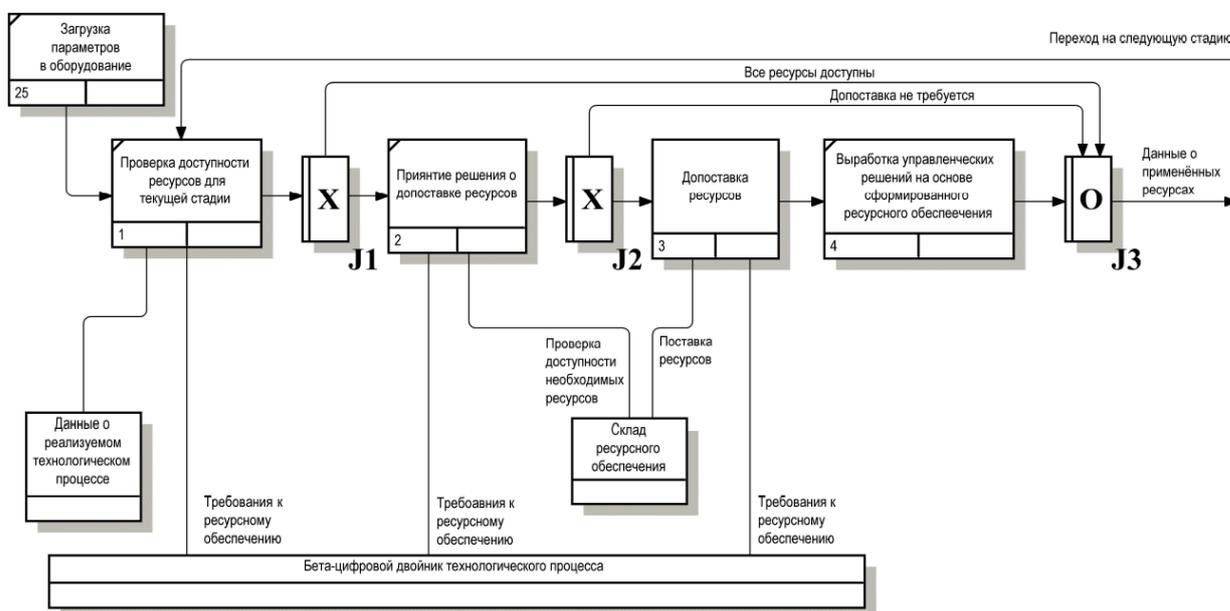


Рисунок 27 — Диаграмма описания процесса ресурсного доопределения технологического процесса.

По завершению фиксации параметров технологического процесса инициируется передача партии изделий и контроля на следующую операцию или завершение технологического процесса в случае выполнения всех операций (рис. 28).

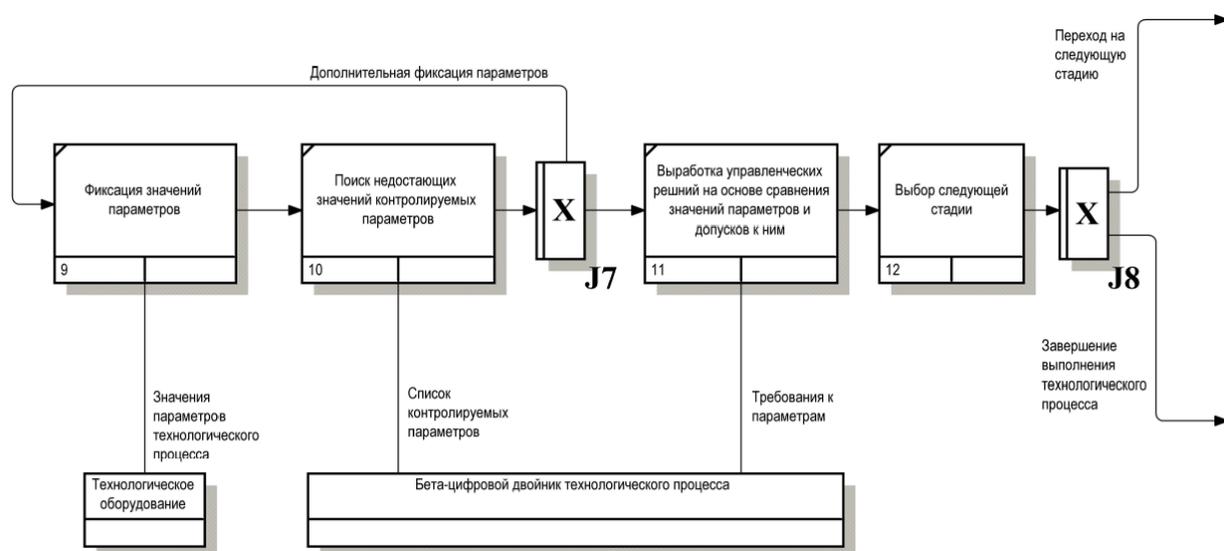


Рисунок 28 — Диаграмма описания процесса фиксирования параметров технологического процесса.

Анализ данных выполняется одновременно с выполнением алгоритмов фиксации и ресурсного определения параметров технологических процессов и их ресурсного обеспечения (рис. 29) и завершается одновременно с окончанием реализации технологического процесса автоматически. При реализации анализа на основе результатов сравнения требований и полученных значений параметров формируется отчёт системы контроля, на основе событий и действий оператора сохраняется лог событий, а полученные значения формируют дополненный цифровой паспорт изделия. Содержание формируемых документов описано далее в текущей главе. На основе отчёта и лога событий могут быть выработаны стратегии модификации цифровых двойников и технологических процессов.

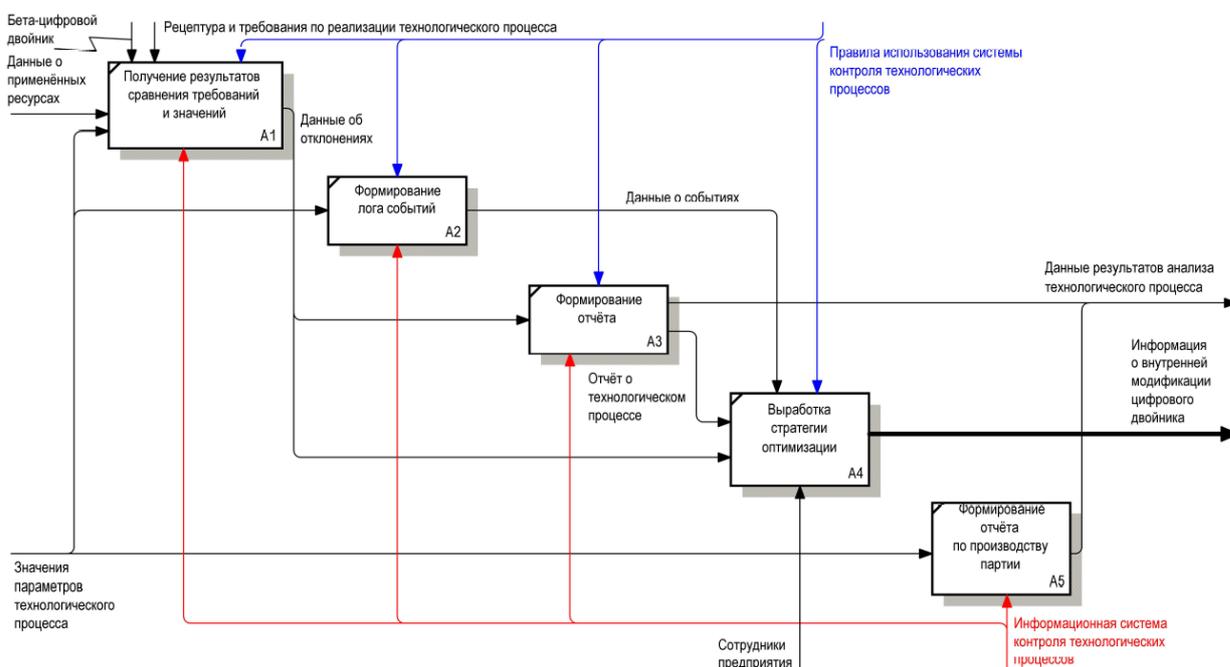


Рисунок 29 — Функциональная модель анализа данных при контроле технологических процессов.

Таким образом, была разработана модель структурно-функционального моделирования системы контроля технологических процессов производства вафель (рис. 30). Следующие модели в нотациях IDEF3 и DFD выполняют описательную задачу с других точек зрения.



Рисунок 30 — Диаграмма дерева узлов структурно-функциональной модели.

3.4.2 Проектирование потоков данных системы контроля технологических процессов

Проектирование потоков данных позволило выделить основные сущности и накопители (рис. 31). Среди сущностей, которые непосредственно участвуют и влияют на работу системы контроля технологических процессов были выделены следующие: разработчик рецептуры, технолог, оператор и мастер цеха.

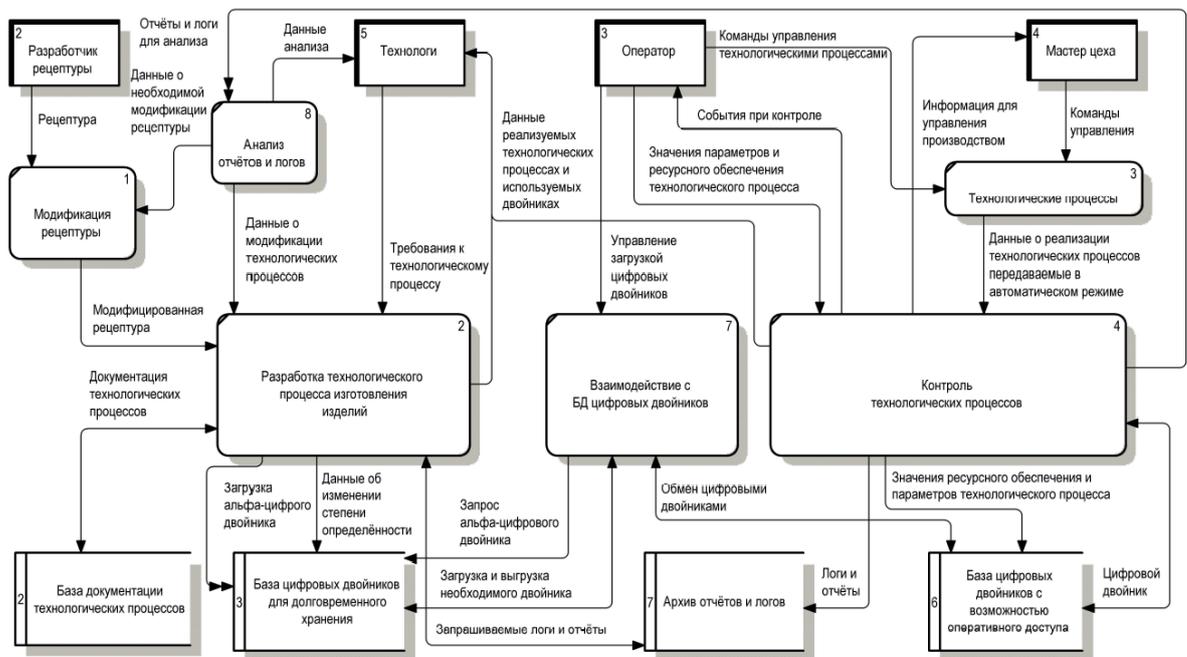


Рисунок 31 — Диаграмма потоков данных системы контроля технологических процессов.

Со стороны разработчика рецептуры формируется рецепт изготовления кондитерского изделия, который после обработки преобразуется в технологический процесс и α -ЦД. Технолог, как обсуждалось ранее в Гл. 2, осуществляет анализ результатов контроля технологических процессов, разрабатывает требования к технологическому процессу, может осуществлять модификацию и предпроизводственное доопределение α -ЦД на основе запросов логов и отчётов произведённых партий изделий.

Оператор является тем лицом, которое непосредственно связано с реализацией функции контроля технологических процессов, в то время как технолог осуществляет подготовку к реализации процессов производства изделий. По этой причине оператор получает информацию о реализации технологических процессов из системы контроля в виде событий и рекомендаций, вносит запрашиваемые значения параметров и ресурсного обеспечения технологических процессов, которые не вносятся или не удалось получить в автоматическом режиме вовремя, но также ему доступны логи и отчёты по запросу. На основе данных контроля, получаемых в режиме реального времени оператор и мастер цеха, могут управлять технологическим процессом с целью уменьшения издержек и вероятности возникновения брака.

Обобщая полученную структурно-функциональную модель, можно выделить основные источники данных для β -ЦД. Такой цифровой двойник партии изделий позволяет объединить в себе сразу несколько баз документов: рецептуру, данные журнала входного и выходного контроля, данные потребления и рынка и применённые параметры технологического процесса (рис. 32), обеспечивая тем самым цифровую трансформацию предприятия.

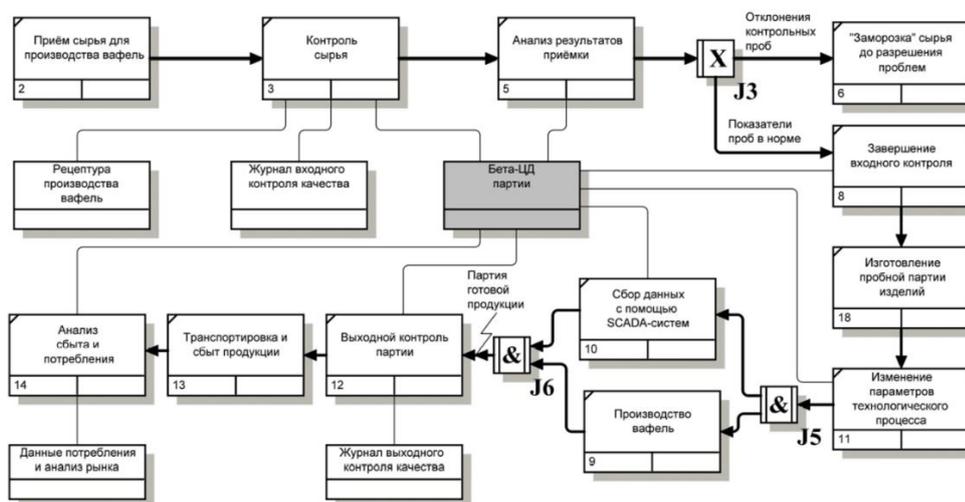


Рисунок 32 — Диаграмма описания процессов при контроле технологического процесса производства вафель.

3.5 Проектирование и разработка процедур применения системы контроля технологических процессов производства вафель

3.5.1 Варианты использования системы контроля технологических процессов

На основе разработанной функциональной модели проектируемой информационной системы контроля технологических процессов можно выделить следующие основные варианты её использования сотрудниками предприятия (рис. 33):

1. для технолога:
 - создание цифрового двойника технологического процесса,
 - получение отчёта и логов реализованного технологического процесса,
 - внешняя и внутренняя модификация цифровых двойников,
 - постпроизводственная аналитика;
2. для оператора:
 - внесение значений параметров и ресурсного обеспечения,
 - сравнительный анализ значений и требований в режиме реального времени;
3. для мастера цеха:
 - получение информации для управления производством,
 - получение логов событий контроля технологических процессов.

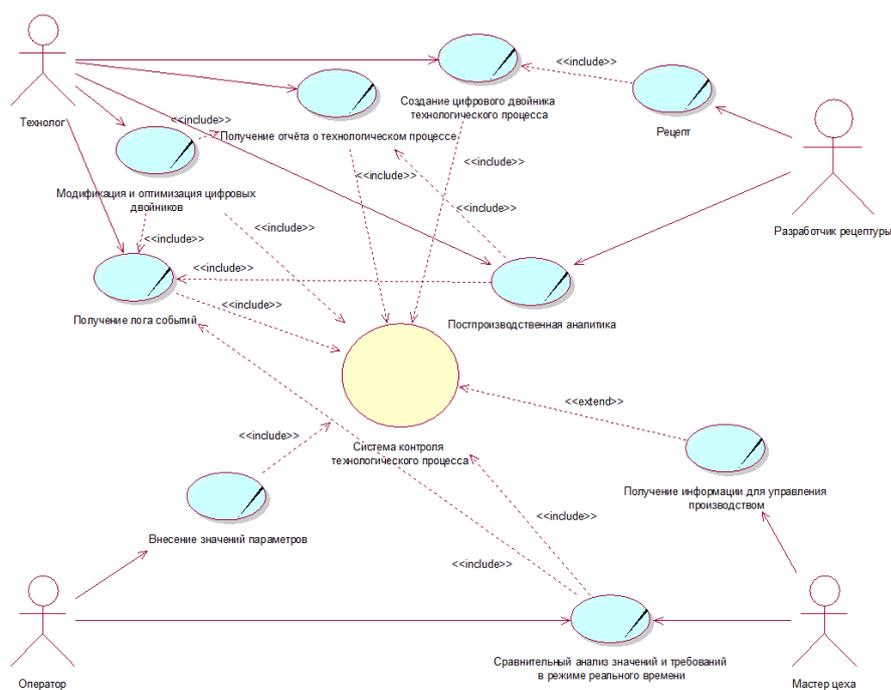


Рисунок 33 — Диаграмма вариантов использования системы контроля технологических процессов.

На данном этапе не предполагается разработка ролевой модели доступа к инструментам и функциям разрабатываемой системы, так как нет необходимости в ограничении прав доступа к информации и документам, которыми оперирует система по причине её локализации в цехе.

3.5.2 Проектирование классов системы контроля технологических процессов

Система контроля технологических процессов предполагает использование два основных класса: α -ЦД и β -ЦД. На основе ранее разработанной структуры таких цифровых двойников (рис. 18) и математической модели системы контроля (п. 2.4) определяется структура соответствующих классов (рис. 34). Для разработки и практической реализации этих классов ранее предложенная концептуальная структура двойника была существенно расширена и конкретизирована, а у каждого атрибута был определён тип данных.

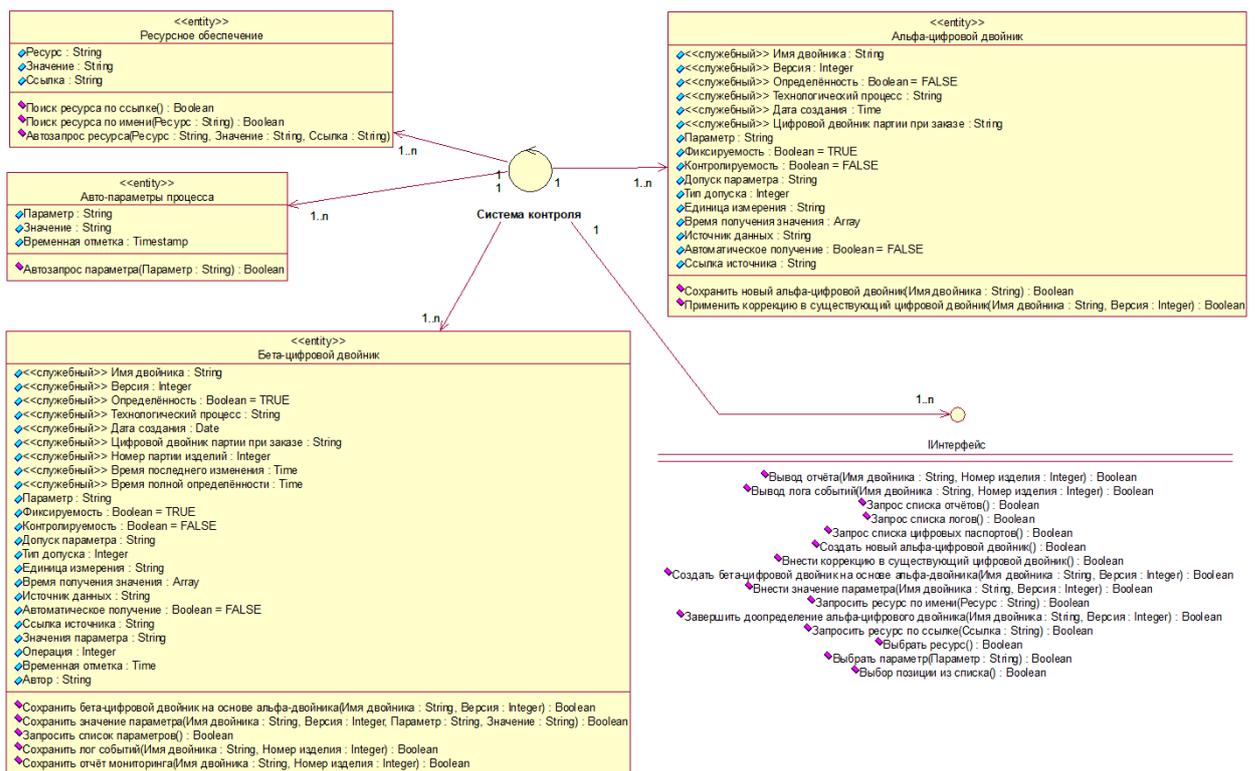


Рисунок 34 — Диаграмма классов системы контроля технологических процессов.

Для решения задач идентификации и формирования логических связей в классы были добавлены служебные атрибуты: «Имя двойника», «Версия», «Определённость» и т.д. Атрибут «Имя двойника» имеет строковый тип и предназначен для идентификации двойника по имени. «Версия» является

номером двойника для реализации процессов их внешней и внутренней модификации. Определённость цифрового двойника задаётся с помощью одноимённого атрибута, имеющего логический тип, что сделано для упрощения последующей реализации системы. Атрибуты «Дата создания» и «Цифровой двойник партии при заказе» задаются опционально.

Остальные атрибуты аналогичны предложенной ранее структуре, за исключением добавления атрибута «Тип допуска», определяющего формат его задания (значение, массив, диапазон и т.д.), «Контролируемость» и «Фиксируемость» для задания типа параметра по контролю и фиксации согласно ранее предложенной классификации (рис. 19), «Автоматическое получение» для определения того, как должно быть получено соответствующее значение с возможностью задания «Ссылки источника» в строковом виде.

Для класса соответствующего β -ЦД добавлены атрибуты «Номер изделия» для необходимой привязки двойника к конкретному изделию, а также «Время последнего изменения» и «Время полной определённости» в формате даты и времени.

Для автоматической фиксации параметров технологического процесса используется класс «Авто-параметры процесса», а для аналогичных операций при ресурсном обеспечении — класс «Ресурсное обеспечение».

Класс «Интерфейс» реализует функции информационного обмена между системой и её пользователем.

3.5.3 Расчёт необходимого объёма памяти для хранения данных контроля технологических процессов

На основе условий применения системы контроля, сформулированных в начале текущей главы имеет место одновременное использование больших множеств цифровых двойников и технологических процессов, которое может обострить проблему доступности и наличия нужного объёма хранилищ данных.

Математическая модель проектируемой системы контроля технологических процессов позволяет оценить минимальный необходимый объём хранилищ для цифровых двойников, который может определяться благодаря формуле (17):

$$V_x = \sum_{i=1}^{|A|} V_{\alpha_i} + \sum_{i=1}^{|B|} V_{\beta_i}, \quad (17)$$

где $|A|$ и $|B|$ – мощность множеств α -ЦД и β -ЦД.

С другой стороны, объём информации, хранимый во всех цифровых двойниках, можно определить на основе суммы параметров, которые введены в систему контроля технологических процессов технологом:

$$V_x = \sum_{i=1}^{|\Delta|} V_{\delta_i}.$$

Расчёт объёма информации на основе неструктурированного набора параметров затруднителен, а также не позволяет учитывать в явном виде хранение наборов α -ЦД и β -ЦД.

Поэтому будем разделять наборы параметров по принципу принадлежности к цифровому двойнику и технологическим процессам, т.е. по одной из цепочек отображений:

$$B \rightarrow A \rightarrow \Gamma$$

или

$$A \rightarrow \Gamma.$$

Вторая цепочка возможна, т.к. при отсутствии выпускаемых изделий для α -ЦД отсутствуют связанные с ним β -ЦД.

Исходя из структуры классов параметров в цифровых двойниках (рис. 17), объём данных, необходимых для хранения одного параметра технологического процесса и его ресурсного обеспечения определяется, как:

$$V_\alpha = \sum_{j=1}^{16} V_j, V_\beta = \sum_{j=1}^{23} V_j,$$

где $V_1 \dots V_{16}$ и $V_1 \dots V_{23}$ — объёмы данных, необходимые для хранения значений полей (атрибутов) соответственно α -ЦД и β -ЦД.

Следовательно, общий объём хранилища, необходимый для всех цифровых двойников, можно определить как:

$$V_x = \sum_{i=1}^{|\Delta|} \sum_{j=1}^{16} V_{\alpha_{ij}} + \sum_{i=1}^{|\Delta|} \sum_{j=1}^{23} V_{\beta_{ij}}$$

что можно записать иначе, опираясь на идентичность частей классов (18):

$$V_x = 2 \sum_{i=1}^{|\Delta|} \sum_{j=1}^{16} V_{\alpha_{ij}} + \sum_{i=1}^{|\Delta|} \sum_{j=17}^{23} V_{\beta_{ij}}. \quad (18)$$

Чтобы осуществить расчёт параметров необходимо определиться с возможными типами атрибутов классов цифровых двойников (рис. 34).

Из-за того, что размер типов данных зависит от разных внешних условий, зададимся следующими размерами типов исходя из использования архитектуры IBM PC и языков программирования C/C++ [186, с. 25]:

- логический (bool) — 1 байт;
- целочисленный (int) — 4 байта;
- вещественный (double) — 8 байт;
- строчный (объект) — N+1 байт (где N — число символов (макс. ~ 2048 байт));
- формат даты и времени (объект) — 5 полей по 4 байта — 20 байт,
- диапазон даты и времени (Array of Time) — 40 байт.

Результат вычисления с использованием формулы (18) может быть получен приближённо с использованием максимальных значений для обеспечения возможности прогнозирования максимального объёма хранилища, необходимого для хранения данных контроля технологических процессов:

$$\max_{\square} V_x = 2 \sum_{i=1}^{|A|} \sum_{j=1}^{16} \max_{\square} V_{\alpha_{ij}} + \sum_{i=1}^{|B|} \sum_{j=17}^{23} \max_{\square} V_{\beta_{ij}},$$

$$\max_{\square} V_x = 2 \cdot |A| \cdot 16456 + |B| \cdot 4164.$$

На основе полученных значений можно получить конечную формулу для расчёта максимального объёма данных в зависимости от количества цифровых двойников (19):

$$V_x = 32\,912 \cdot |A| + 4\,164 \cdot |B|. \quad (19)$$

Полученная формула (19) позволяет рассчитать минимальный объём информационного хранилища для цифровых двойников. При разработке и внедрении системы контроля технологических процессов на основе неё может осуществляться соответствующий расчёт хранилища для более эффективного внедрения системы с учётом особенностей реальных производственных условий.

3.5.4 Разработка последовательности взаимодействия в системе контроля технологических процессов

Как говорилось ранее, система контроля технологических процессов взаимодействует с мастером цеха, оператором и технологом и строится на основе операций классов системы.

Данные кооперации в системе (рис. 35) формируют четыре последовательных этапа:

1. загрузка α -ЦД,
2. ресурсное определение,
3. фиксация параметров,
4. производственная аналитика.

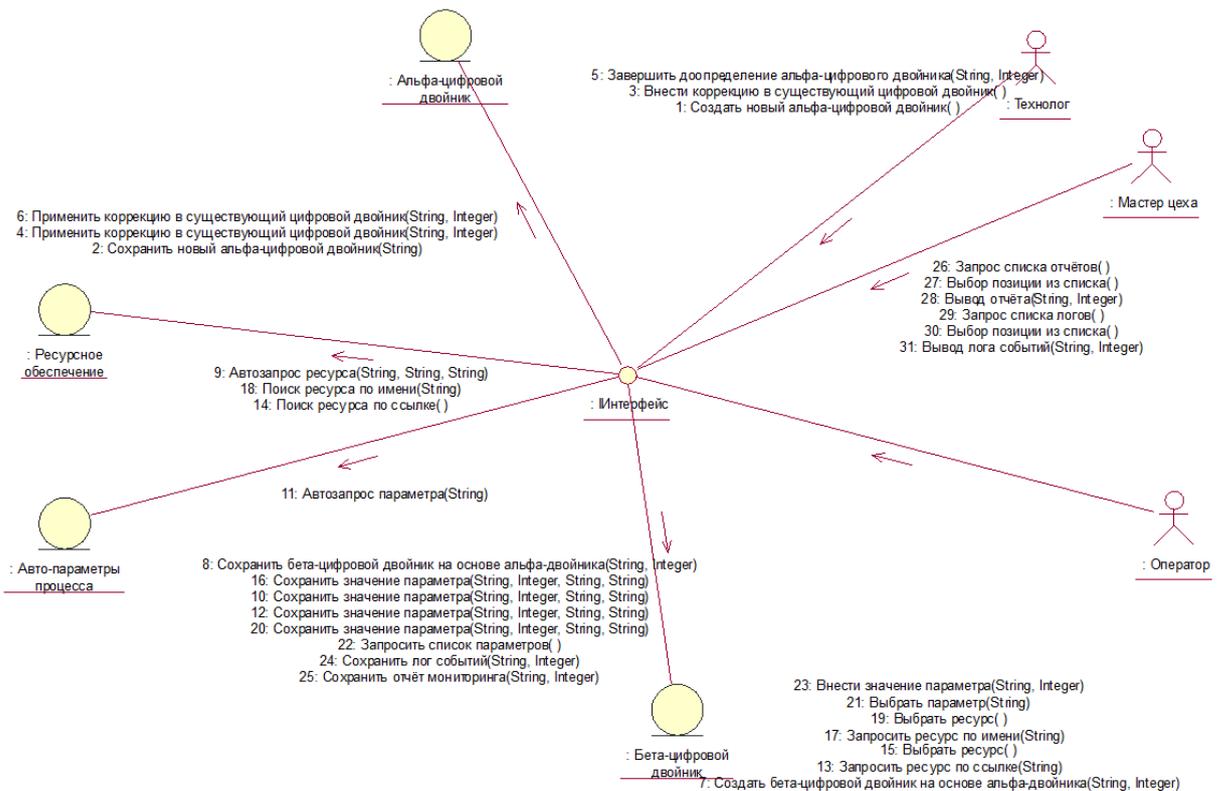


Рисунок 35 — Диаграмма кооперации в системе контроля технологических процессов.

На первом этапе технолог через интерфейс системы выполняет создание нового α -ЦД. В ходе создания он обязан задать его имя и связать с технологическим процессом. Некоторые атрибуты, такие как время, дата создания, версия и другие инициализируются автоматически на основе известных данных о времени, имеющихся версий в базе и на основе значений по умолчанию. После первичного заполнения атрибутов класса «Альфа-цифровой двойник» выполняется сохранение экземпляра в базу долговременного хранения цифровых двойников. После этого технолог может вносить коррекцию в цифровой двойник, осуществляя изменение его атрибутов или ресурсное доопределение перед запуском технологического процесса с последующим сохранением изменений. Когда редактирование считается завершенным, технолог завершает доопределение α -ЦД, после чего в атрибут «Определённость» сохраняется значение TRUE, что означает его

готовность к использованию при контроле и реализации соответствующего технологического процесса.

На втором этапе оператор на основе имени α -ЦД (или по имени техпроцесса) и его версии создаёт β -ЦД. В ходе этой операции все данные α -ЦД копируются в соответствующие атрибуты класса нового β -ЦД, которому присваивается номер, соответствующий номеру партии изделий, а также задаётся временная отметка последнего изменения. Новая версия β -ЦД помещается в хранилище оперативного доступа для реализации функции контроля.

В ходе ресурсного доопределения β -ЦД выполняется автозапрос ресурсного обеспечения на основе имени, значения и ссылки, представленных в строковом виде, а в ходе фиксации параметров аналогичным образом фиксируются параметры из внешних источников. Кроме автоматического получения значений параметров оператор может вносить недофиксированные значения вручную, а ресурсы запрашивать из баз данных на основе ссылки или значения.

По завершению технологического процесса изготовления партии изделий система контроля сохраняет лог событий и отчёт с указанием имени связанного двойника и его версии.

На четвёртом этапе технологом осуществляется запрос списков отчётов и логов, выбор нужных позиций и их загрузка для анализа.

3.5.5 Разработка алгоритмов контроля технологических процессов

Алгоритм загрузки α -ЦД в систему (рис. 36) начинается с поиска связанного с технологическим процессом α -ЦД. Далее, если он не найден, то возникает ошибка и предлагается остановить контроль, если он найден, то осуществляется его проверка после полного определения.

В случае, если загруженный цифровой двойник некорректен, то контроль останавливается с ошибкой, иначе создаётся β -ЦД и выполняется его первичная идентификация по номеру изделия и времени создания. Далее итерационно по количеству операций технологического процесса выполняются ресурсное определение β -ЦД и фиксация значений параметров.

Алгоритм определения ресурсов (рис. 37) состоит из этапов автоопределения, проверки доступности, необходимости и возможности допоставки, ожидания ресурсов и проверки ресурсов.

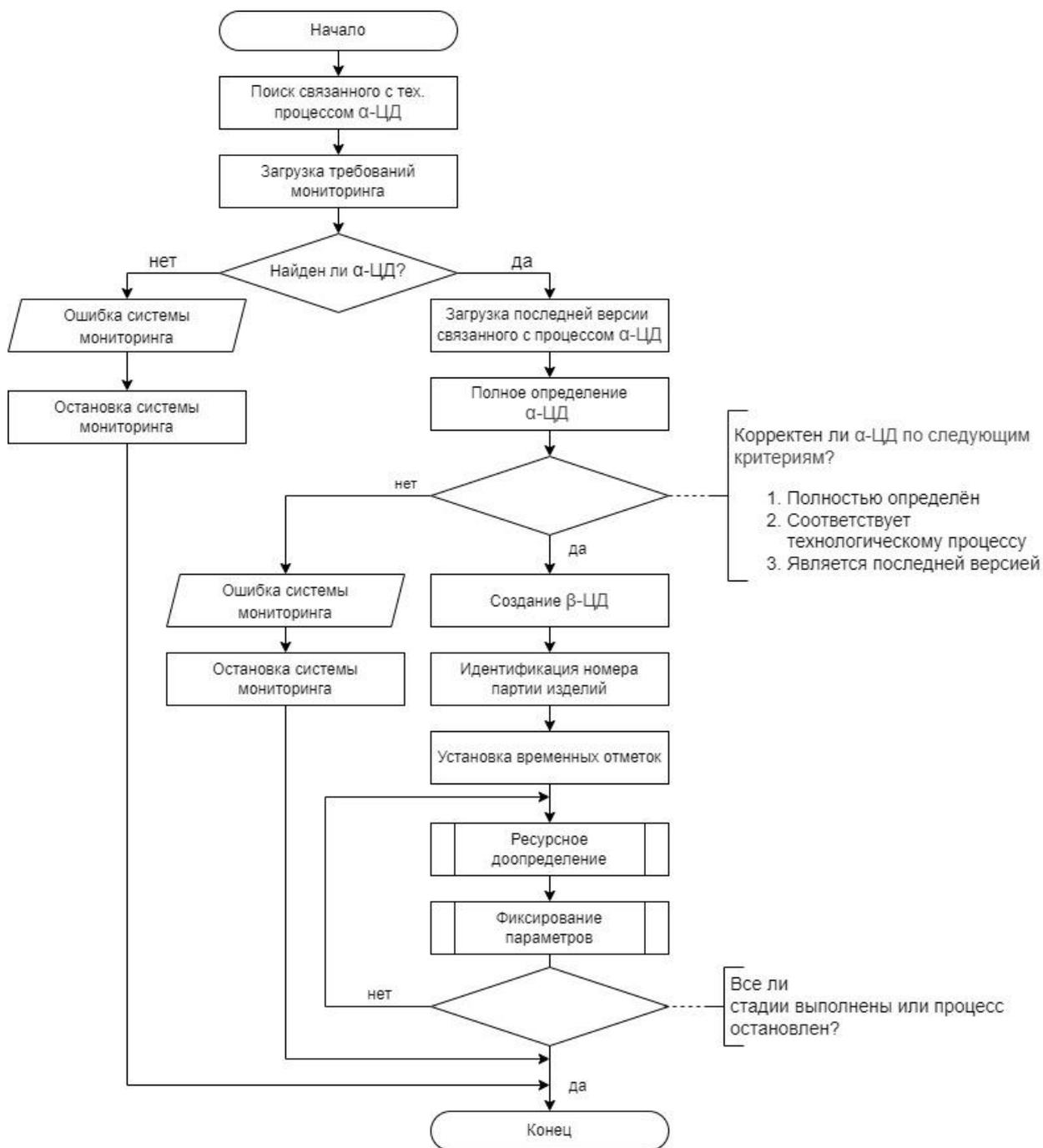


Рисунок 36 — Алгоритм загрузки α -ЦД.

Алгоритм фиксации параметров (рис. 38) состоит из автоматической и ручной фиксации, проверки получения всех фиксируемых, контролируемых параметров, а затем сравнительного анализа в режиме реального времени.

Алгоритмы ресурсного определения и фиксации параметров могут приводить к остановке контроля и рекомендации по остановке технологического процесса.

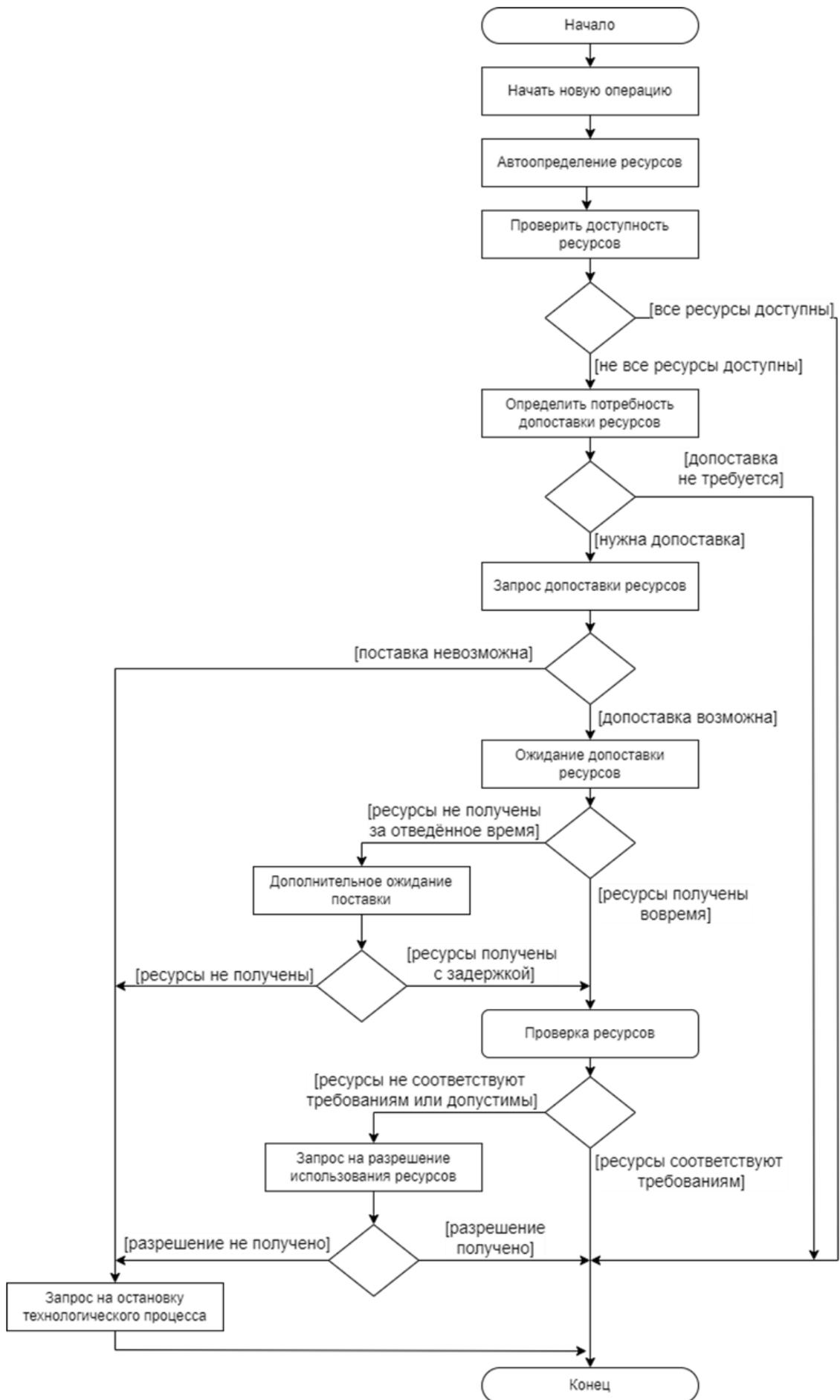


Рисунок 37 — Алгоритм ресурсного доопределения технологического процесса.

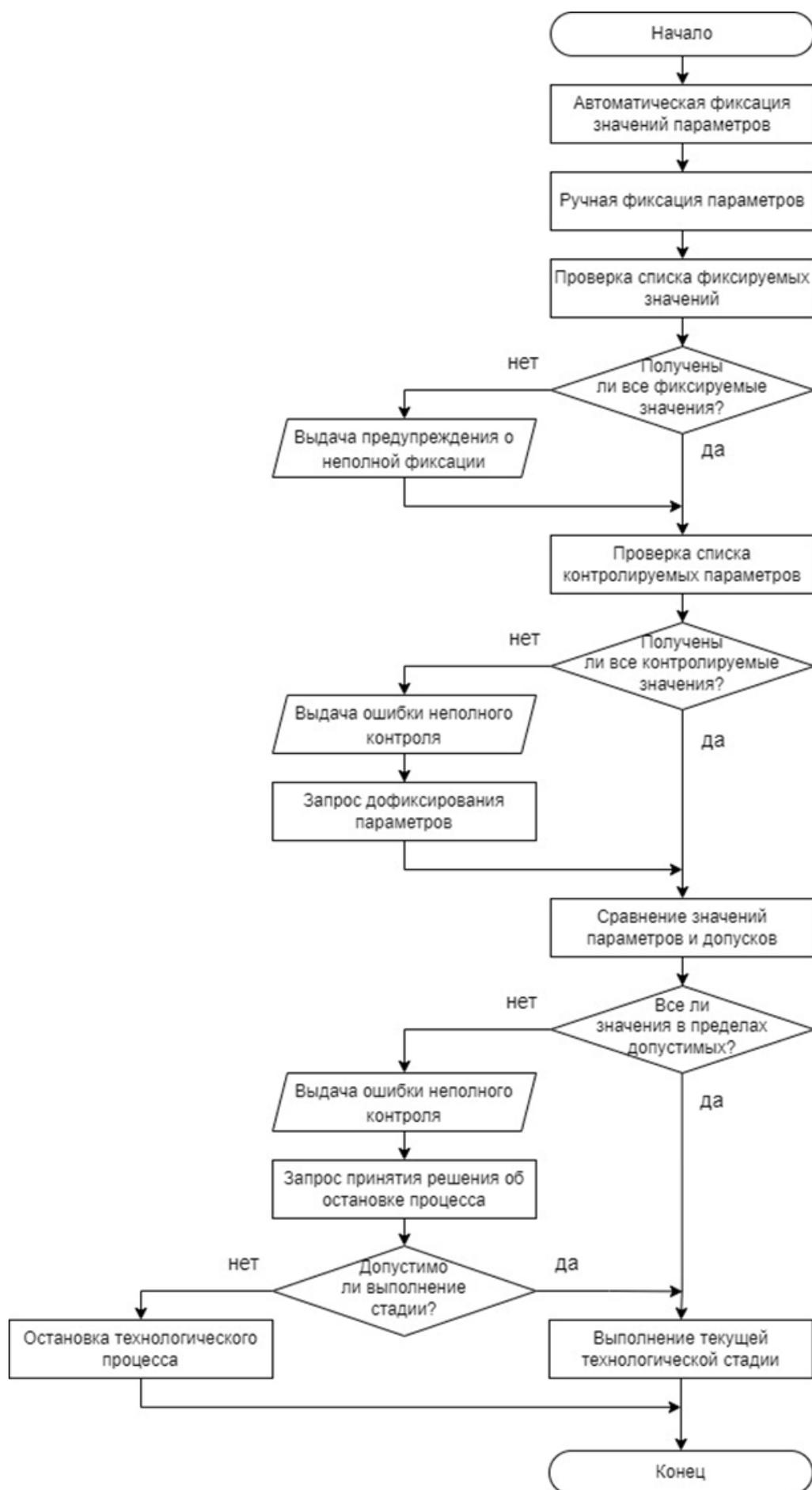


Рисунок 38 — Алгоритм фиксации параметров технологического процесса.

3.5.6 Процедура формирования отчёта и лога событий

После завершения контроля и технологического процесса реализуется процедура постпроизводственной аналитики.

Результаты сравнительного анализа требований и значений параметров представляются в отчёте системы контроля технологических процессов в форме таблицы, в которой содержатся все фиксируемые параметры технологических процессов, допуска, полученные значения параметров технологического процесса, рассогласование и поле положительного или отрицательного результата сравнения, связанного с удовлетворением требованиям.

Ранее были показаны разные способы задания допуска параметра технологического процесса, поэтому в процессе проведения анализа необходимо рассмотреть каждый тип задания отдельно.

- При использовании в допуске единичного значения параметра технологического процесса, указывается величина его рассогласования с полученной в процессе контроля величиной.
- Если допуск был задан несколькими значениями, то указывается рассогласование с ближайшим по величине значением параметра технологического процесса.
- Для диапазона или нескольких диапазонов указывается рассогласование с ближайшей границей, а если эти диапазоны задавались с шагом, то до ближайшего шага.
- В случае использования текстовых значений или ссылок рассогласование не указывается, но делается отметка о соответствии полученного значения с требуемым.

Кроме отчёта, в ходе работы системы контроля формируется лог событий. Он представляет собой полный список всех событий, которые происходили в процессе обработки изделия, для которого был проведён контроль технологического процесса. Для каждого события указывается время, наименование, стадия возникновения по последовательности алгоритма и принадлежность к исполнителю, технической системе или человеку, с которым связано это событие. Все события из лога система контроля технологического процесса разделяет на:

- 1) штатные события,
- 2) предупреждения,

- 3) ошибки технологических процессов (несоответствия значений параметров технологических процессов и ресурсов или их отсутствие),
- 4) критические ошибки системы контроля технологических процессов.

3.6 Апробация методики контроля для технологического процесса производства вафель

3.6.1 Проектирование информационного обеспечения АСУ ТП производства вафель

На основе разработанной структурно-функциональной и объектно-ориентированной моделей можно перейти к практической реализации предлагаемого в данной работе программного обеспечения АСУ ТП производства вафель.

Исходя из соображений удобства и экономии ресурсов на текущем этапе диссертационного исследования было принято решение реализовать предлагаемый комплекс методов и алгоритмов на базе существующей SCADA-системы мониторинга производства вафель. Модульный принцип организации современных SCADA-систем позволяет реализовать собственные модули, обладающие полноценным и необходимым функционалом для решения поставленных задач контроля.

Несмотря на то, что целью данной работы является разработка комплекса методов и алгоритмов автоматизированного контроля технологических процессов производства вафель на основе цифрового двойника, то справедливо выполнить реализацию этого комплекса на базе классического функционала SCADA-систем, к которому относится (рис. 39):

- реализация интерфейса оператора,
- сбор данных технологического процесса,
- реализация пользовательских сценариев,
- аварийная сигнализация,
- ведение журнала событий,
- реализация системы алармов.

Именно благодаря функции разработки пользовательских сценариев (а иногда собственных менеджеров) можно провести разработку модулей цифрового технологического контроля.

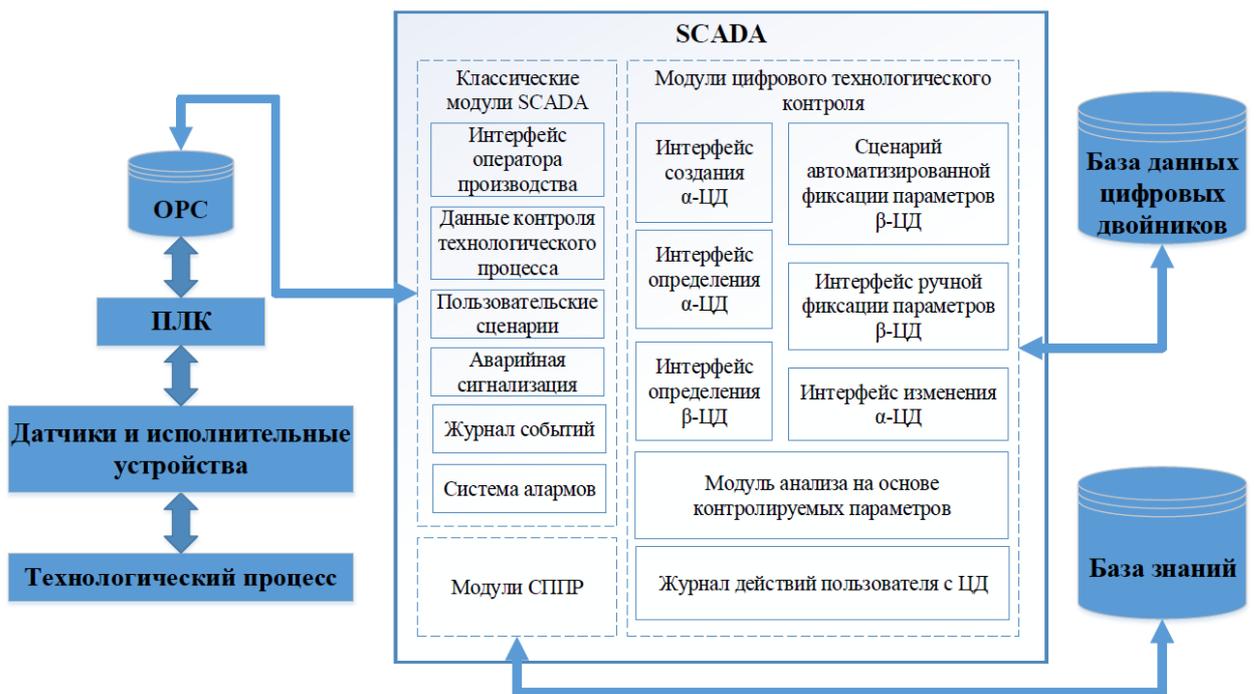


Рисунок 39 — Структура обеспечивающей системы АСУ ТП.

Сбор данных технологического процесса осуществляются в соответствии с классической архитектурой АСУ ТП, с использованием ПЛК и ОРС-сервера. Эти данные передаются в SCADA и одновременно используются модулями цифрового технологического контроля.

В рамках подсистемы цифрового технологического контроля реализованы интерфейсы взаимодействия с оператором для обеспечения возможностей информационного обмена с цифровыми двойниками и ручной фиксации параметров, а также модуль сопоставления значений параметров с требованиями к технологическому процессу и модуль ведения журнала событий цифровых двойников.

Компонент подсистемы поддержки принятия решений был также реализован на базе SCADA по аналогичным причинам и будет рассмотрен далее.

В качестве главного хранилища данных о производстве вафель используется база цифровых двойников, а для реализации поддержки принятия решений — база знаний, которая включает в себя уже разработанные в данной работе методы представления, определения и структуры цифровых двойников и правила их модификации и отображения множеств параметров и двойников процессов.

3.6.2 Разработка архитектуры подсистемы поддержки принятия решений при производстве вафель

Реализация управляющего воздействия будет осуществляться на основе подсистемы поддержки принятия решений, которая работает в связке с системой контроля технологического процесса производства вафель. Стоит отметить, что подсистема поддержки принятия решений не является целью настоящего диссертационного исследования и не обладает научной новизной, а является примером того, как могут использоваться данные, которые собирает и систематизирует основная система контроля технологического процесса производства вафель, комплекс методов и алгоритмов которой уже обладают новизной.

Классические средства АСУ ТП и методы контроля дают большой набор данных о протекании технологического процесса и его ресурсного обеспечения. С помощью цифровых двойников и новой методики цифрового технологического контроля эти данные собираются и систематизируются. Полученный набор систематизированных данных может позволить эффективно решить задачу поддержки принятия решений, которая в свою очередь основывается на разработанных структурно-параметрических моделях и математических моделях связей параметров технологических процессов, разработанных ранее (табл. 16).

Реализация подсистемы поддержки принятия решений может быть реализована на основе предложенной в данной работе архитектуры (рис. 40). В данной архитектуре предлагается пять модулей: выбор параметров мониторинга, управление базами данных, оценки условий и формирования рекомендаций.

При функционировании системы получение информации осуществляется из нескольких источников. В первую очередь, это данные мониторинга, которые собираются классическими способами через OPC-сервер и обрабатываются модулем мониторинга. Данные входного и выходного контроля запрашиваются с соответствующих серверов, на которые осуществляется выгрузка первичных данных отделом входного и выходного контроля на основе лабораторных анализов и взятием контрольных проб. Математические и параметрические модели для реализации функции формирования рекомендации извлекаются из базы знаний на основе выполненных ранее расчётов. Основным источником большого набора требований и получателем данных контроля технологического процесса

производства вафель является база данных цифровых двойников, где содержатся множества обоих типов цифровых двойников.

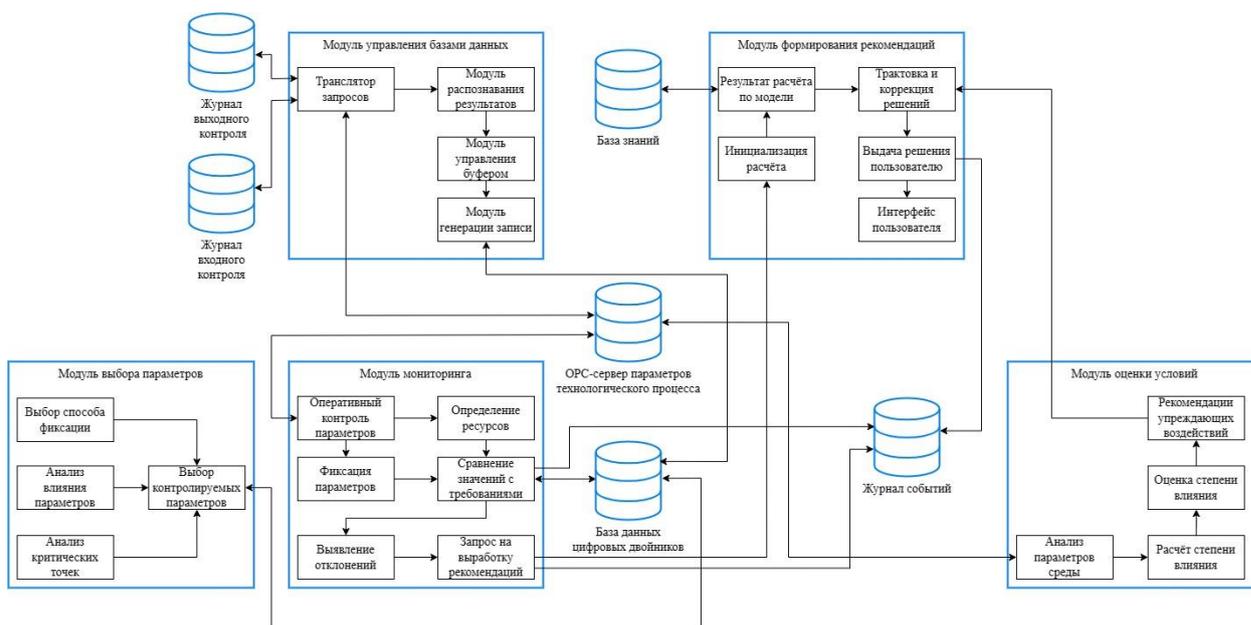


Рисунок 40 — Архитектура подсистемы поддержки принятия решений.

Модуль выбора отвечает за отбор тех, которые подлежат контролю. Модули оценки условий, мониторинга и управления базами данных работают автоматизировано в режиме «мягкого» реального времени и выполняют задачи, соответствующие их наименованию. Модуль формирования рекомендаций выполняет финальную задачу выдачи предложений пользователю системы контроля по коррекции параметров технологических процессов на основе оперативного и предиктивного анализа параметров технологических процессов.

3.6.3 Разработка базы данных цифровых двойников

В рамках настоящего диссертационного исследования особый интерес представляет модель базы данных цифровых двойников. Ранее заявлялось, что цифровой двойник технологического процесса охватывает все стадии жизненного цикла вафель, поэтому потребовалось разработать несколько связанных моделей.

Корневой моделью базы данных цифровых двойников рассматривается реляционная физическая модель данных (рис. 41). Она включает сущности α -ЦД и β -ЦД, связанные неидентифицирующими связями в соответствии с математической моделью системы, разработанной в п. 2.4.

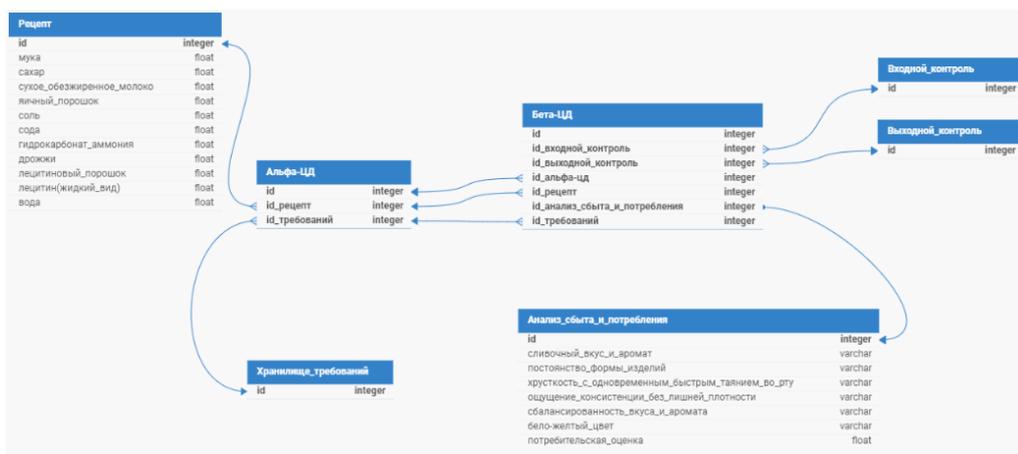


Рисунок 41 — Корневая модель базы данных цифровых двойников.

Так как α -ЦД по определению содержит требования к технологическому процессу, то к соответствующей сущности с помощью идентифицирующих связей типа «один-ко-многим» подключены рецептуры со значениями компонентов и большое хранилище требований к технологии производства. Сущность «рецептура» включает в себя все возможные ингредиенты с численными значениями из расчёта на 100 г. муки [74], хранилище требований связано аналогично. Сама сущность α -ЦД определяется составным первичным ключом, состоящим из полей «id»-цифрового двойника, «id-рецепта» и «id-требований». Сущность β -ЦД включает в себя поля, которые являются ключами в сущностях входного и выходного контроля и анализа сбыта и потребления последней стадии жизненного цикла производимого изделия.

Хранилище требований включает в себя информацию по технологиям с разбиением по стадиям и маршрутам, применяемому оборудованию, ингредиентам, ГОСТам, климату и персоналу (рис. 42).

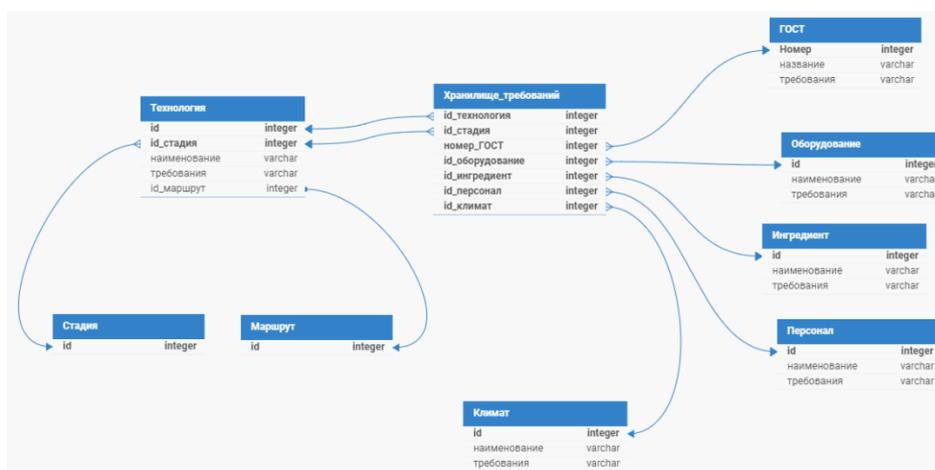


Рисунок 42 — Модель базы данных хранилища требований к технологическому процессу.

Данные по входному и выходному контролю (рис. 43 и 44) содержат в себе информацию о полученных ресурсах, а также данные о том, как были соблюдены требования по технологическим, органолептическим, физико-химическим, складским параметрам и по параметрам безопасности продукции.



Рисунок 43 — Модель базы данных входного контроля.

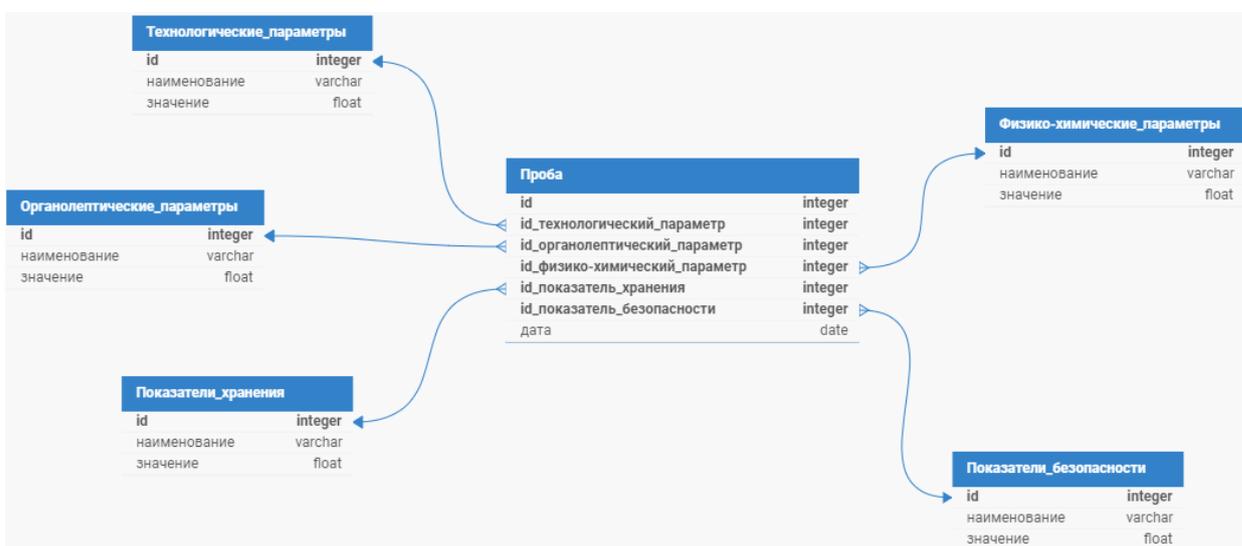


Рисунок 44 — Модель базы данных выходного контроля.

3.6.4 Применение методов и алгоритмов контроля на основе SCADA

Реализация предложенных в настоящей работе методов и алгоритмов выполнялась в виде программного модуля для действующей SCADA-системы на базе многорецептурного пищевого производства вафель ОАО «Рот-Фронт» Холдинга «Объединенные кондитеры» г. Москва (прил. 1).

SCADA-система (рис. 45) для управления технологическим процессом производства вафель охватывает все производственные участки. Доступ к цифровому двойнику осуществляется с помощью дополнительного меню, где отдельно можно получить информацию об используемой рецептуре, списке контролируемых и фиксируемых параметрах, а также данные входного и выходного контроля.

Фиксация параметров выполняется из своей базы тегов, к которой можно осуществить доступ через журнал событий (рис. 46). Параметры, фиксируемые для цифрового двойника, передаются в его собственную базу данных, пример которой представлен в формате XML (рис. 47).

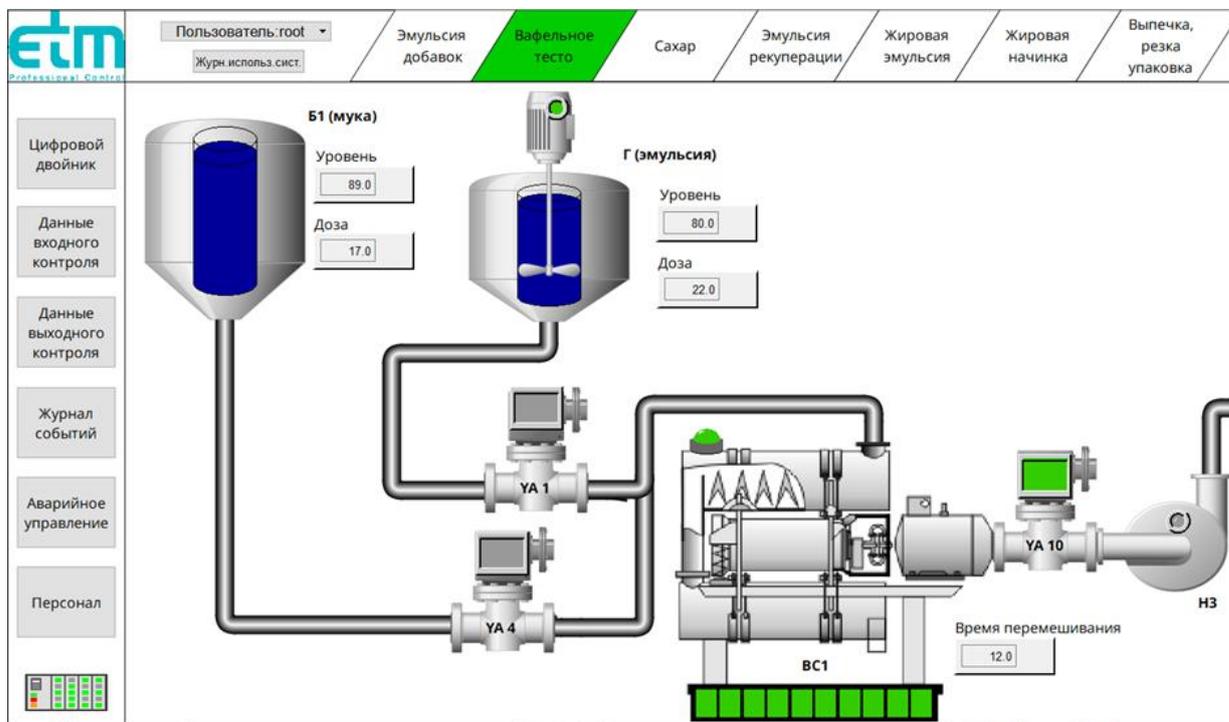


Рисунок 45 — Интерфейс SCADA-системы с возможностью вызова цифрового двойника партии.

Время	Значение	Содержание	Статус	Элемент DP/Описание
03.12.2023 8:05:07	20	20	-----	... Доза Б1.
03.12.2023 8:05:22	10	10	-----	... ВС время.
03.12.2023 8:05:53	50	50	-----	... Б2 уровень.
03.12.2023 8:05:56	50	50	-----	... Б2 уровень.
03.12.2023 8:06:55	19	19	-----	... Доза Б2.
03.12.2023 8:06:57	19	19	-----	... Доза Б2.

Рисунок 46 — Фрагмент журнала событий фиксации параметров технологического процесса в SCADA.

Дата создания	Номер партии	Время последнего изменения	Время полной определенности	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 47 — Фрагмент базы параметров технологического процесса в цифровом двойнике.

Далее показаны примеры интерфейсов пользователя в соответствии с разработанной структурой обеспечивающей подсистемы.

Реализована механика создания нового, доопределения или коррекции действующего цифрового двойника с возможностью выбора типа, указания

активного цифрового двойника, применяемого для внесения параметров и индикацией текущего активного цифрового двойника (рис. 48).

Управление цифровыми двойниками

α-ЦД β-3215

β-ЦД Текущий ЦД: β-3215

Рисунок 48 — Интерфейс управления цифровыми двойниками (α-ЦД и β-ЦД)

Метод создания цифровых двойников реализован через интерфейс определения его атрибутов (рис. 49) в соответствии с описанной ранее моделью базы данных (рис. 41). Определение атрибутов выполняется с помощью выпадающего списка допустимых значений на основе имеющихся в базе данных цифровых двойников.

Создание нового β-ЦД

Имя (id): 847

Входной контроль (id): 4557

Выходной контроль (id): 6178

Базовый α-ЦД (id): 32

Рецептура (id): C12

Требования (id): B154-23

Создать ассоциации по анализу сбыту

Рисунок 49 — Интерфейс создания нового β-ЦД.

Интерфейс ручного ввода параметров (рис. 50) реализует возможность вносить значения параметров технологического процесса и его ресурсного обеспечения при отсутствии возможности автоматизированного сбора данных. Окно доступно к вызову вручную или появляется на основе настроенных групп опроса.

Ручной ввод параметров

Текущий ЦД: β-3215

Параметр:

Значение:

Ед. изм.: Об/мин.

Рисунок 50 — Интерфейс ручной фиксации параметров β-ЦД.

На рис. 51 представлен пример интерфейса с сообщением об аварийном уменьшении числа оборотов на стадии смешивания эмульсии, где пользователь может остановить процесс смешения или пропустив сообщение, приняв возможные риски на себя.

Внимание!



Параметр оборотов на стадии смешивания эмульсии меньше 150 об/мин!

Рисунок 51 — Аварийное сообщение об отклонении параметра.

Модули подсистемы поддержки принятия решений в соответствии с архитектурой (рис. 40) реализованы с помощью встроенного в SCADA инструментария разработки пользовательских сценариев. Внутри сценариев осуществляется взаимодействие с базой знаний и подбором соответствующей математической модели расчёта влияния параметра. Пример предупреждения подсистемы поддержки принятия решений представлен рис.52.

Предупреждение модуля СППР!



Масса производимых листов близка к нижнему критическому значению. Требуется проверить зазоры пластин в печи.

Рисунок 52 — Предупреждающее сообщение об отклонении параметра.

Применение методов и алгоритмов контроля технологических процессов многорецептурного производства вафель позволило снизить издержки (отходы) производства в среднем по разным партиям на 6 %, но из-за частного характера этого результата, численное значение не выносится в качестве основного результата диссертационной работы.

Снижение издержек обусловлено тем, что применение цифровых двойников на разных стадиях жизненного цикла партии вафель привело к формированию обширного набора данных о партии (рецептура, параметры технологического процесса и его ресурсного обеспечения, данные входного и выходного контроля). На основе этого набора удалось повысить эффективность решения задач анализа при запуске новых партий изделий с другими рецептурами, что привело к уменьшению ломкости вафельных листов при их резке и уменьшению брака, а в целом — к обозначенному выше результату по снижению издержек. Кроме того, предложенный набор данных способствует цифровизации многорецептурного производства, снижению влияния человеческого фактора на качество выпускаемой продукции через более точный подбор ингредиентов, а также в целом цифровой трансформации предприятия.

3.7 Проверка методики контроля технологического процесса в условиях мелкосерийного многономенклатурного производства

3.7.1 Описание производственного участка

Следует отметить, что основа для данной работы была заложена при выполнении рамках ПНИЭР [230]. Часть исследований вышеупомянутой работы выполнялась на базе действующего производственного участка ЗАО Производственная компания «Станкопресс» г. Коломна.

Данный цех механической обработки малых и средних деталей использует современные обрабатывающие центры с ЧПУ, где возможна обработка единичных деталей и малых партий, благодаря чему можно говорить о мелкосерийной специализации этого производственного участка.

На данном участке размещено 9 единиц оборудования (рис. 53), осуществляющих механическую и тепловую обработку изделий (табл. 18).

В качестве примера рассматривалось изделие «кольцо коромысла стального нижнее» (ГОСТ 535-88, масса 5,3 кг) и в отличие от пищевого производства было установлено соответствие цифровой двойник — изделие вместо целой партии.

3.7.2 Моделирование производственной системы ЗАО ПК «Станкопресс»

Производственная система, описанная выше, соответствует условиям, в которых должна функционировать разрабатываемая в данной работе методика контроля технологических процессов. Для проверки методики выполнялось имитационное моделирование производственной системы цеха по производству машиностроительных изделий в среде Visual Components версии 4.4 на кафедре промышленной информатики РТУ МИРЭА, где выполнялась настоящее диссертационное исследование (рис. 54).



Рисунок 54 — Визуализация имитационной модели производственной системы АО ПК «Станкопресс».

Компоновка имитационной модели идентична реальной производственной системе АО ПК «Станкопресс» по набору оборудования. Для моделирования каждого рабочего места и обрабатывающего оборудования использованы соответствующие объекты из библиотеки программного обеспечения. В каждом объекте определены соответствующие настройки, которые ставят его в соответствие с реальным производственным оборудованием, т.е. заданы его параметры в виде временных затрат и параметров обработки конкретных изделий. Транспортные функции реализуются вручную с использованием человеческих ресурсов.

Разработанная имитационная модель производственной системы, верифицирована с реальной производственной системой.

3.7.3 Реализация методики контроля технологических процессов в условиях имитационной модели производственной системы

Предложенная в данной работе методика контроля технологического процесса реализована в описанной выше имитационной модели с целью её проверки и возможности обоснованного внедрения в реальных производственных условиях. Для решения этой задачи в имитационной модели реализованы методы и алгоритмы данной методики.

С использованием принципов объектно-ориентированного программирования и языка программирования высокого уровня Python реализованы методы создания, представления и хранения данных. Метод создания обоих типов цифровых двойников технологических процессов проходит в автоматическом режиме через загрузку файла с параметрами технологических процессов, который автоматически формируется на основе документации технологического процесса изготовления изделия. Далее осуществляется разбор параметров в соответствии с объектно-ориентированной структурой цифрового двойника (рис. 18, 55, 56).

Метод и алгоритм определения реализуются через внесение значений и допусков параметров в структуры обоих типов цифровых двойников, а для β-ЦД — только после выполнения алгоритма создания, реализуемого в автоматическом режиме. Посредством проведения методов и алгоритмов определения изменяется степень определённости цифровых двойников технологических процессов в соответствии с одноимённым методом.

<<entity>> Альфа-цифровой двойник	Значения
◆<<служебный>> Имя двойника : String	"DT_1257"
◆<<служебный>> Версия : Integer	3
◆<<служебный>> Определённость : Boolean = FALSE	TRUE
◆<<служебный>> Технологический процесс : String	"TP.12.157.45"
◆<<служебный>> Дата создания : Time	30.05.20
◆<<служебный>> Цифровой двойник изделия при заказе : String	"PCR19.10.023"
◆Параметр : String	"TP.12.157.45 / ROUTE-3 / SEQ_OP-2 / Total_time"
◆Фиксируемость : Boolean = TRUE	TRUE
◆Контролируемость : Boolean = FALSE	TRUE
◆Допуск параметра : String	"24"
◆Тип допуска : Integer	1
◆Единица измерения : String	"min"
◆Время получения значения : Array	April 2020
◆Источник данных : String	WCT-13
◆Автоматическое получение : Boolean = FALSE	TRUE
◆Ссылка источника : String	"select * from TOTALTIME.tableName@dbLink... "

Рисунок 55 — Сущностное представление α-ЦД.

<<entity>> Бета-цифровой двойник	Значения
◆<<служебный>> Имя двойника : String	"DT_1257"
◆<<служебный>> Версия : Integer	3
◆<<служебный>> Определённость : Boolean = TRUE	TRUE
◆<<служебный>> Технологический процесс : String	"TP.12.157.45"
◆<<служебный>> Дата создания : Date	30.05.20
◆<<служебный>> Цифровой двойник изделия при заказе : String	"PCR19.10.023"
◆<<служебный>> Номер изделия : Integer	79
◆<<служебный>> Время последнего изменения : Time	12:48:54 30.05.20
◆<<служебный>> Время полной определённости : Time	none
◆Параметр : String	"TP.12.157.45 / ROUTE-3 / SEQ_OP-2 / ..."
◆Фиксируемость : Boolean = TRUE	TRUE
◆Контролируемость : Boolean = FALSE	TRUE
◆Допуск параметра : String	"24"
◆Тип допуска : Integer	1
◆Единица измерения : String	"min"
◆Время получения значения : Array	April 2020
◆Источник данных : String	WCT-13
◆Автоматическое получение : Boolean = FALSE	TRUE
◆Ссылка источника : String	"select * from TOTALTIME.tableName@dbLink ..."
◆Значения параметра : String	"11"
◆Операция : Integer	3
◆Временная отметка : Time	12:45:54 30.05.20
◆Автор : String	"dbLink"

Рисунок 56 — Сущностное представление β-ЦД.

Алгоритмы фиксации и ресурсного определения выполняются в автоматическом режиме с контролем времени и обеспечения режима реального времени.

Результатом реализации методики контроля на имитационной модели были сформированы лог, отчёт и дополненный цифровой паспорт изделия, содержащие значения параметров выполненного технологического процесса. Цифровой паспорт изделия дополнительно рассмотрен далее, в следующем разделе.

В ходе внедрения предложенного комплекса была модернизирована действующая система контроля технологических процессов, разработанная в рамках ПНИЭР RFMEFI58016X0008 [230] на АО «Станкопресс» в г. Коломна, и достигнут рост эффективности производства и сокращение времени на принятие управленческих решений.

3.7.4 Дополненный цифровой паспорт изделия

Технический паспорт на изделие — один из основных эксплуатационных документов, который подтверждает гарантию качества выпускаемого изделия. Согласно ГОСТ [228] документ изготавливается после завершения изготовления и подготовки изделия к эксплуатации и включает в себя описание технических характеристик основных сведений об изделии и технические данные, ресурсы, сроки службы и хранения и пр. [222].

Одним из положений практической значимости данной работы является обеспечение возможности дополнять цифровой паспорт выпускаемого

изделия при реализации предлагаемой методики контроля. Это дополнение включает в себя данные в виде значений параметров протекания технологического процесса изготовления этого изделия и соответствие их требованиям технолога для обеспечения возможности анализировать эти данные, чтобы определить, в чём может быть проблема выхода из строя эксплуатируемого изделия. В рамках предлагаемого инструментария системы контроля по необходимости дополнение паспорта может редактироваться пользователем в соответствии с его задачами относительно количества отображаемых полей контроля и фиксируемых параметров.

В зависимости от необходимости сохранять эксплуатационные данные об изделии, может заполняться паспорт или формуляр изделия [223], а в условиях цифровых производств эти документы формируются в цифровом виде. С учётом этих особенностей разрабатываемая методика контроля позволяет вносить названные выше дополнения как в цифровой паспорт, так и в цифровой формуляр изделия. Для упрощения в тексте данной работы говорится, что данный инструментарий позволяет формировать дополненный цифровой паспорт изделия, но при этом имеется ввиду, что вместо паспорта может формироваться и цифровой формуляр изделия. Работа и создание документов не в цифровом виде в данной работе не рассматривалась.

Последним важным документом, создаваемым после завершения изготовления изделия, является его цифровой паспорт. Цифровой паспорт содержит:

- 1) Отклонения фиксируемых контролируемых параметров технологических процессов и ресурсов (ошибки технологических процессов);
- 2) Данные об ответственности лиц и систем, связанных с предупреждениями и ошибками (цифровой двойник, технологический процесс, технолог, мастер цеха и т.д.);
- 3) Результаты проверки соответствия времени получения значений о параметре или ресурсе технологических процессов (определения уровня достоверности);
- 4) Статистические данные о предупреждениях (о неконтролируемых параметрах).

3.8 Выводы по гл. 3

В 3 главе разработана модель информационной системы контроля технологических процессов и предложена методика организации и

применения систем контроля технологических процессов многорецептурного производства по изготовлению вафель, описанная структурно-функциональной и объектно-ориентированной моделями информационной системы. Данная методика, обеспечивающая хранение информации с использованием баз данных цифровых двойников, её систематизацию и оперативный анализ в режиме реального времени, формализовала новый подход к эффективной организации информационного обеспечения систем управления технологическими процессами.

Для методики контроля технологических процессов была разработана модель данных для хранения данных о реализуемых технологических процессах. В качестве примера управляющего воздействия, которое может формироваться на основе данных контроля реализована подсистема поддержки принятия решений, использующая разработанные в предыдущем разделе математические зависимости параметров и структурно-параметрические модели.

Апробация предлагаемой методики контроля технологических процессов была выполнена на базе действующего многорецептурного пищевого производства вафель ОАО «Рот-Фронт» Холдинга «Объединенные кондитеры» г. Москва, которая позволила получить сокращение издержек. Результаты настоящего диссертационного исследования были переданы предприятию для дальнейшего внедрения.

Предложенная методика и результаты моделирования позволили разрабатывать системы контроля многорецептурных технологических процессов и обеспечивать цифровую трансформацию предприятий с последующим повышением эффективности деятельности за счёт более эффективного мониторинга.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

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 решений 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.

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.

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.

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.

СЛОВАРЬ ТЕРМИНОВ

α -ЦД: цифровой двойник технологического процесса, создаваемый разработчиком рецептуры, доопределяемый технологом и содержащий параметры технологического процесса и его предполагаемого ресурсного обеспечения.

β -ЦД: цифровой двойник технологического процесса, созданный на основе реализуемого технологического процесса и содержащий фактические значения параметров изготовления партии изделий и применённых ресурсов.

Жизненный цикл цифрового двойника технологического процесса: совокупность повторяющихся процессов от стадии создания цифрового двойника и до его утилизации.

Кастомизация: процесс выпуска индивидуализированной продукции в соответствии с требованиями потребителей через внесение в неё настраиваемых изменений без изменения основных параметров.

Внешняя модификация цифрового двойника: процесс внесения в него вынужденных изменений и создания его новой версии вследствие внешних причин, связанных с изменением конструктивных характеристик изделия, материала, изменения производственных условий и т.д.

Внутренняя модификация цифрового двойника: процесс его совершенствования без создания новой версии вследствие внутренних причин, связанных с ошибками при разработке, мероприятиями по повышению эффективности производства.

Мониторинг технологического процесса: процесс сбора данных о технологическом процессе и его ресурсном обеспечении для последующего анализа и реализации эффективных стратегий управления технологическими процессами.

Цифровой двойник технологического процесса: информационно-логическая структура, которая определяется ключевыми параметрами технологических процессов и их протеканием.

ПУБЛИКАЦИИ АВТОРА 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 Science²

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.

¹ В соответствии с пунктом 5 правил формирования перечня рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук (далее – Перечень), утвержденных приказом Минобрнауки России от 12 декабря 2016 г. № 1586 (зарегистрирован Минюстом России 26 апреля 2017 г., регистрационный № 46507), с изменениями, внесенными приказом Минобрнауки России от 12 февраля 2018 г. № 99 (зарегистрирован Минюстом России 15 марта 2018 г., регистрационный № 50368), считаются включенными в Перечень (по состоянию на 12 апреля 2022 г.).

² Издания, текущие номера которых или их переводные версии входят хотя бы в одну из международных реферативных баз данных и систем цитирования Web of Science, Scopus, PubMed, MathSciNet, zbMATH, Chemical Abstracts, Springer или GeoRef считаются включенными в перечень по отраслям науки, соответствующим их профилю. К данным изданиям Требования не предъявляются. (п. 5 Приложение N 1. Правила формирования перечня рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук, утв. приказом Министерства образования и науки Российской Федерации от 12 декабря 2016 г. N 1586).

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).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Абаев Г.Е., Демкович Н.А., Яблочников Е.И. Роль и задачи имитационного моделирования на этапе перехода от цифрового производства к «умным фабрикам» // ИММОД-2017. 2017. С. 219–227.
2. Аверченков В. И., Казаков Ю. М. Автоматизация проектирования технологических процессов: учебное пособие / В. И. Аверченков, Ю. М. Казаков, М.: Флинта, 2011. 229 с.
3. Аксенова Л. М. [и др.]. Особенности технического регулирования в производстве мучных кондитерских изделий // Материалы Девятой международной конференции «Торты. Вафли. Печенье. Пряники». Москва, 25–27 февраля. 2014. С. 18–20.
4. Албагачиев А. Ю. [и др.]. Современные методы диагностики и компенсации погрешностей станков с ЧПУ // Естественные и технические науки. 2018. № 1 (115). С. 113–115.
5. Алешина Ю. А. Научно-практические аспекты разработки и товароведной оценки вафель специализированного назначения: дис. ... канд. техн. наук: 05.18.15. Кемеровск. технол. институт пищев. промышл., Кемерово, 2013 — 132 с.
6. Антамошкина Е. А. Моделирование реализации технологических процессов // Вестник сибирского государственного аэрокосмического университета им. академика М.Ф. Решетнева. 2012. № 4 (44). С. 4–7.
7. 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).., 2018.
8. Антонов С. В. Разработка структуры цифрового двойника для эффективного мониторинга технологических процессов // Научный альманах Центрального Черноземья. №1-2. 2022. С. 17–23.
9. 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.
10. Астахова Н. В., Ермолаева Е. О., Трофимова Н. Б. Разработка системы менеджмента безопасности пищевых продуктов на основе принципов ХАССП при производстве вафель шоколадных // Пищевая промышленность. 2020. № 5. С. 39–43.
11. Афанасьева Ю. И., Рыбаков А. В., Шурпо А. Н. О возможности производства пищевых продуктов с использованием «Умных систем» // Ученые записки Комсомольского-на-амуре государственного технического университета. 2020. № 5 (45). С. 87–93.
12. Балыхин М. Г. [и др.]. Автоматизированные системы мониторинга современных производств на основе web-технологий // Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности. 2018. № 3 (375). С. 151–154.

13. Бевз Е. Д. Политика государства в условиях автоматизации // Международный научный журнал «Синергия наук». 2018. № 20. С. 509–514.
14. Беляев В. В. Анализ состояния отечественного машиностроения // Вестник СамГУ. 2014. № 6 (117). С. 39–47.
15. Беляева М. А. Цифровая трансформация производственных процессов в пищевой промышленности // Сборник статей X Международной научной конференции «Абалкинские чтения» «Стратегия России: взгляд в завтрашний день». Москва, 26–27 апреля 2021 года. 2021. С. 166–174.
16. Биктимиров В. Р., Ращупкина А. А. Современные методики управления качеством. Цифровой двойник // «Современные научные исследования и разработки». 2018. № 8 (25). С. 34–36.
17. Благовещенский В. Г. [и др.]. Современное использование технологии кастомизации в пищевой индустрии / Сборник докладов всероссийской научно-практической конференции «Интеллектуальные автоматизированные управляющие системы в биотехнологических процессах». Москва, 29 марта 2023 года. 2023. С. 67–76.
18. Благовещенский В. Г. [и др.]. Анализ технологического процесса производства вафель как объекта автоматизации / Сборник докладов всероссийской научно-практической конференции «Интеллектуальные автоматизированные управляющие системы в биотехнологических процессах». Москва, 29 марта 2023 года. 2023. С. 35–49.
19. Благовещенский В. Г. [и др.]. Анализ готовности к цифровизации кондитерских производств / Сборник научных докладов IV Международной специализированной конференции-выставки «Фабрика будущего: переход к передовым цифровым, интеллектуальным производственным технологиям, роботизированным системам для отраслей пищевой промышленности». 2023. С. 41–50.
20. Благовещенский И. Г. [и др.]. Применение web-технологий для создания автоматизированных систем мониторинга производства пищевых продуктов / Сборник докладов научно-практической конференции с международным участием «Роговские чтения». Москва, 16 декабря. 2022. С. 121–125.
21. Благовещенский И. Г. Автоматизированная экспертная система контроля в потоке показателей качества помадных конфет с использованием нейросетевых технологий и систем компьютерного зрения: дис. ... канд. техн. наук: 05.13.06. МГУПП, Москва, 2015 — 218 с.
22. Борзенко А. Чем отличаются СМБПП и ХАССП // Сообщество профессионалов «Управление качеством» [Электронный ресурс]. URL: <https://3quality.ru/blog/pishhevaja-bezopasnost/chem-otlichayutsya-smbpp-i-hassp/> (дата обращения: 08.01.2024).
23. Боровков А. И. [и др.]. Компьютерный Инжиниринг / А. И. Боровков, С. Ф. Бурдаков, О. И. Клявин, А. А. Мельникова, А. А. Михайлов, [и др.], СПб.: Политехн. ун-т, 2012. 93 с.
24. Боровков А. И. [и др.]. Цифровые двойники и цифровая трансформация предприятий ОПК // Вестник Восточно-Сибирской открытой академии. С. 1–39.

25. Боровков А. И., Рябов Ю. А. Цифровые двойники: определение, подходы и методы разработки / Сборник трудов научно-практической конференции с зарубежным участием «Цифровая трансформация экономики и промышленности.» 2019. С. 234–245.
26. Будникова А. А., Кондратьев В. Ю. Цифровые двойники // Сборник материалов XI международного студенческого форума «Информационное общество: современное состояние и перспективы развития». 2018. С. 132–136.
27. Валеев С. Г., Клячкин В. Н. Особенности построения регрессионных моделей при многомерном контроле технологического процесса // Научный журнал «Радиоэлектроника, информатика, управление». 2002. № 1 (7). С. 48–51.
28. Васильков А. В. Компьютерное моделирование технологических процессов и элементов автоматизированных систем производства композиционных материалов: дис. ... канд. техн. наук: 05.13.18. — Пенз. гос. технол. академия, Пенза, 2012 — 166 с.
29. Волкова Е. О., Сонных М. В., Холопов В. А. Индустрия 4.0 Подготовка технических специалистов будущего // Автоматизация в промышленности. 2017. № 7. С. 25–28.
30. Воробьев Н. В. Диагностика нарушений в ходе технологического процесса с использованием расширенных фильтров Калмана: дис. ... канд. техн. наук: 05.13.06. СПб. гос. технол. институт (техн. университет), Санкт-Петербург, 2013 — 95 с.
31. Гарев К. В. [и др.]. Автоматизация технологического процесса производства вафель и возможность использования цифрового двойника в качестве инновационного инструмента / Сборник материалов конференции «Интеллектуальные системы и технологии в отраслях пищевой промышленности». Москва, 23 апреля 2019 года. 2019. С. 40–46.
32. Гельмгольц К. Скорость распространения нервного возбуждения / К. Гельмгольц, М.: Политиздат, 1923. 134 с.
33. Гореткина Е. Siemens о цифровом двойнике, Интернете вещей, российских реалиях и новинках NX 11 // Электронное издание «ISICAD» [Электронный ресурс]. URL: http://isicad.ru/ru/articles.php?article_num=18627 (дата обращения: 07.05.2018).
34. Григорьев С. Н., Мартинов Г. М. Концепция построения базовой системы числового программного управления мехатронными объектами // Информационные технологии в проектировании и производстве. 2011. № 2. С. 21–27.
35. Грудинин В. Г. Современная нормативная база процедур выборочного контроля по альтернативному признаку // Вестник ИрГТУ. 2013. № 5 (76). С. 25–32.
36. Гузилов А. В., Мышенков К. С., Симонов М. Ф. Анализ качества case-средств для функционального моделирования систем / Сборник статей Всероссийской межвузовской конференции молодых учёных «Информационно-аналитические и интеллектуальные системы для производства и социальной сферы». Москва, 21–22 апреля. 2021. С. 18–29.

37. Демьянова О. В., Диммиева А. Р. Жизненный цикл и возможности цифровой трансформации компании // «Современные проблемы управления и регулирования». 2018. С. 108–119.
38. Долженко Р. А., Малышев Д. С. Проблемы на пути цифровой трансформации на российских промышленных предприятиях // Вестник НГУЭУ. 2022. № 1. С. 31–51.
39. Дородных Е. Е. Анализ внедрения цифрового производства на промышленных предприятиях // Промышленная политика в цифровой экономике: проблемы и перспективы. 2017. С. 380–394.
40. Доросинский Л. Г., Зверева О. М. Информационные технологии поддержки жизненного цикла изделия / Л. Г. Доросинский, О. М. Зверева, Ульяновск: Зебра, 2016. 243 с.
41. Евгеньев Г. Б. [и др.]. Основы автоматизации технологических процессов и производств : учебное пособие : т. 1 / Г. Б. Евгеньев, С. С. Гаврюшин, А. В. Грошев, М. В. Овсянников, П. С. Шильников, М.: Издательство МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2015. 441 с.
42. Ивашкин Ю. А. Системный анализ и исследование операций в прикладной биотехнологии. Учебное пособие / Ю. А. Ивашкин, М.: МГУПП, 2005. — 196 с.
43. Ивашкин Ю. А., Назойкин Е. В. Структурно-параметрические и агентноориентированные технологии. Лабораторный практикум / Ю. А. Ивашкин, Е. В. Назойкин, М.: МГУПП, 2010. — 134 с.
44. Игнатьев С. А. Обеспечение качества формообразования деталей точного машиностроения на основе мониторинга технологического процесса и оборудования: дис. ... канд. техн. наук: 05.03.01. — Саратовск. гос. тех. университет, Саратов, 2009 — 405 с.
45. Игнатьев С. А., Горбунов В. В., Игнатьев А. А. Мониторинг технологического процесса как элемент системы управления качеством продукции : монография / С. А. Игнатьев, В. В. Горбунов, А. А. Игнатьев, Саратов: Сарат. гос. техн. ун-т, 2009. 160 с.
46. Калякулин С. Ю., Кузьмин В. В. Разработка математической модели параметров технологического процесса // Вестник МГТУ «Станкин». 2014. № 3 (30). С. 40–44.
47. Калякулин С. Ю., Кузьмин В. В. Информационные модели связей как средство автоматизации расчётов параметров технологического процесса // Вестник МГТУ «Станкин». 2015. № 2 (33). С. 89–92.
48. Карелина Е. Б., Благовещенская М. М., Клехо Д. Ю. Автоматизированная система мониторинга оборудования и хода технологического процесса на пищевом предприятии / I Научно-практическая конференция с международным участием «передовые пищевые технологии: состояние, тренды, точки роста». Москва, 29–30 ноября. 2018. С. 673–680.
49. Касимов С. А., Самойлова Е. М. Автоматизированная система интеллектуального мониторинга изготовления распределительных валов // Вестник ПНИПУ. Машиностроение, материаловедение. 2015. № 4 (17). С. 151–161.

50. Кириллов И. Е., Морозов И. Н. Подход к созданию адаптивной модели технологического процесса с целью осуществления оперативно-предупреждающего управления // Труды кольского научного центра РАН. 2014. № 5 (24). С. 221–225.
51. Клепиков С. И. Мониторинг в машиностроении / Комплексное обеспечение показателей качества транспортных и технологических машин: сб. ст. 7-й Междунар. конф. 2001. С. 163–166.
52. Клячкин В. Н., Кравцов Ю. А. Обнаружение нарушений при многомерном статистическом контроле технологического процесса // Международный журнал «Программные продукты и системы». 2016. № 3 (29). С. 192–197.
53. Клячкин В. Н., Кравцов Ю. А., Охотников И. А. Алгоритмы обнаружения нарушений при многомерном статистическом контроле технологического процесса // Вестник УлГТУ. 2014. № 1 (65). С. 48–51.
54. Ковалева И. А., Соловьева И. С. Цифровые технологии в пищевой промышленности / Материалы III Всероссийской научно-практической конференции “Современные тенденции развития инвестиционного потенциала в России”. Москва, 23 марта 2021 года. 2021. С. 146–150.
55. Компания «Веста» Сертификация системы ХАССП и системы менеджмента безопасности пищевой продукции. Основные отличия [Электронный ресурс]. URL: <https://testslab.ru/stati/sertifikaciya-sistemy-hassp-i-sistemy-menedzhmenta-bezopasnosti-pishchevoj-produkcii-osnovnye-otlichiya/> (дата обращения: 08.01.2024).
56. Комраков А. В., Сухоруков А. И. Концепция цифрового двойника в управлении жизненным циклом промышленных объектов // Сетевой научный журнал «Научная идея». 2017. № 3 (3). С. 3–9.
57. Коробенков А. Цифровая система управления производством – важный шаг к «Индустрии 4.0» // Вектор высоких технологий. 2016. № 6 (27). С. 50–52.
58. Коротовских А. Е. Определение понятия цифровая трансформация промышленного предприятия // Актуальные научные исследования в современном мире. 2021. № 11-14 (79). С. 86–90.
59. Красин П. С., Данович Л. М., Тарасенко Н. А. Применение методов имитационного моделирования при проектировании технологии кондитерского производства // Электронный сборник материалов I Международной научно-практической конференции “Инновационные технологии в пищевой и перерабатывающей промышленности”. Краснодар, 20–22 ноября 2012 года, 2012. С. 347–350.
60. Краснов А. Е., Кузнецов А. С. Системный подход к разработке концепции цифровых двойников для научно-исследовательских лабораторий // Информатизация образования и науки. 2024. № 1 (61). С. 6–18.
61. Кудряшов В. Л., Соколова Е. Н. Проблемы и пути создания производства пищевых добавок с учетом НТИ «FOODNET» / Сборник материалов XVI Международной научно-практической конференции. Том 1. «Пища. Экология. Качество». Барнаул, 24–26 июня 2019 года. 2019. С. 400–404.

62. Кузнецов Л. А., Корнеев А. М., Журавлёва М. Г. Идентификация статистических моделей технологических процессов с заполнением пропусков в данных // Проблемы управления. 2007. № 1. С. 46–50.
63. 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.
64. Кутыркин С. Б. Некоторые проблемы СМБПП и новая версия ISO 22000 // Контроль качества продукции. 2019. № 5. С. 11–13.
65. Лейберова Н. В. Разработка рецептур и оценка качества безглютеновых мучных кондитерских изделий: дис. ... канд. техн. наук: 05.18.15. Кемеровск. технол. институт пищев. промышл., Кемерово, 2012 — 155 с.
66. Локтев И. И., Власов В. А., Тихомиров И. А. Вопросы моделирования технологического процесса // Известия ТПУ. 2005. № 6 (308). С. 90–94.
67. Мальков М. В., Олейник А. Г., Федоров А. М. Моделирование технологических процессов: методы и опыт // Труды кольского научного центра РАН. 2010. № 3 (3). С. 93–101.
68. Мартинов Г. М. Развитие систем управления технологическими объектами и процессами // Вестник МГТУ «Станкин». 2008. № 1. С. 74–79.
69. Мартинов Г. М. Современные тенденции развития компьютерных систем управления технологического оборудования // Вестник МГТУ «Станкин». 2010. № 1 (9). С. 119–125.
70. Мартинов Г. М., Мартинова Л. И. Перспективы развития систем числового программного управления в концепции «Индустрия 4.0» // Инновации. 2016. № 8 (216). С. 17–19.
71. Матерова Д. Л. Совершенствование технологии вафельных листов с применением современных добавок при производстве вафель с начинками // Студенческий вестник. 2022. № 46–11 (238). С. 57–63.
72. Мелихова О. А., Мелихова З. А. Имитационное моделирование сложных технологических процессов // Известия ТРТУ. 2004. № 3 (38). С. 178–181.
73. Митрофанов В. Г., Драчев О. И., Капитанов А. В. Моделирование и управление производственными системами / В. Г. Митрофанов, О. И. Драчев, А. В. Капитанов, Ирбит: Оникс, 2011. 239 с.
74. Мэнли Д. Мучные кондитерские изделия с рецептурами / Д. Мэнли, СПб: Профессия, 2013. 423–443 с.
75. Никитина М. А., Краснова И. С., Семенов Г. В. Цифровые модели сублимированных продуктов питания заданного состава и свойств // Математические методы в технологиях и технике. 2023. № 2. С. 34–39.
76. Носенко С. М., Чувахин С. В. Оборудование кондитерского производства XXI века. Часть 4. Мучные кондитерские изделия : справочное пособие / С. М. Носенко, С. В. Чувахин, Москва : ДеЛи плюс, 2018. - 438 с. : ил., 2018.
77. ООО «БалансТорг» Вафельная крепость. Новый путь к качеству и снижению брака в вафельном производстве [Электронный ресурс] // Вафельная крепость. Новый путь к качеству и снижению брака в вафельном

производстве. URL: <https://brest.pulscen.by/firms/99655109/news/475163/> (дата обращения: 08.01.2024).

78. Осипов Ю. И. [и др.]. Управление качеством в машиностроении / Ю. И. Осипов, А. А. Ершов, А. Ю. Осипов, Н. А. Быстрова, Б. А. Кушунин, [и др.], М.: Наука, 2009. 399 с.

79. Пак К. С. Система мониторинга критических контрольных точек при производстве вафель с начинкой 2020.С. 614–618.

80. Пащенко Г. Н. Построение нейросетевой модели для технологического процесса варки стекла // Проблемы информатики. 2013. № 4. С. 56–59.

81. Петрешин Д. И., Суслов А. Г., Федонин О. Н. Управление параметрами качества поверхностного слоя деталей машин в условиях неопределённости // Прогрессивные технологии и системы машиностроения. 2016. № 4 (55). С. 57–61.

82. Позднеев Б. М. [и др.]. Новые горизонты стандартизации в эпоху цифрового обучения и производства // Вестник МГТУ «Станкин». 2015. № 4 (35). С. 101–108.

83. Пронина Е. В. Цифровой двойник в современном производстве // Сборник материалов XXXV Международной научно-практической конференции «Scientific prospectives». 2017. С. 58–60.

84. Прохоров А., Лысачев М. Цифровой двойник. Анализ, тренды, мировой опыт. Издание первое, исправленное и дополненное. – М.: ООО «АльянсПринт», 2020. – 401 стр., ил. / А. Прохоров, М. Лысачев, под ред. А. Боровков,.

85. Пуш А. В. Моделирование и мониторинг станков станочных систем // СТИН. 2000. № 9. С. 12–20.

86. Рассолов Т. В. Реорганизация производственных процессов и обеспечение их мониторинга в условиях многономенклатурного мелкосерийного производства: дис. ... канд. техн. наук: 05.02.22. МАТИ — Рос. гос. технол. университет им. К.Э. Циолковского, Москва, 2013 — 149 с.

87. Розно М. И. Рациональный мониторинг и управление технологическими процессами // Методы менеджмента качества. 2013. № 5. С. 38–44.

88. Ромашкова И. А., Лосаберидзе Т. Л. Реализация концепции «цифрового двойника» в российском производстве как этап перехода к четвертой промышленной революции // «Постулат». 2018. № 5–1 (31). С. 139–144.

89. Рыжова А. А., Рыжов Д. А. Применение концепции Индустрия 4.0 для решения ключевых задач современных предприятий // Вестник технологического университета. 2018. № 4 (21). С. 184–188.

90. Рябков О. А. Высокотехнологичное производство – основа инновационной экономики // Управление экономическими системами: электронный научный журнал. 2017. № 3 (97). С. 9.

91. Савенкова Т. В. Научные принципы создания технологий функциональных кондитерских изделий: дис. ... докт. техн. наук: 05.18.01. Рос. академия сельскохоз. наук, Москва, 2006, 2006 — 479 с.

92. Самойлова Е. М. Системный интегрированный подход к управлению качеством продукции на основе интеллектуализации мониторинга в едином

- информационном пространстве // Вестник ПНИПУ. Машиностроение, материаловедение. 2017. С. 179–195.
93. Сергеев А. С., Плотников А. Л., Уварова Т. В. Мониторинг процесса торцевого фрезерования в САПР ТП многолезвийной обработки // Известия ВолгГТУ. 2015. № 6 (163). С. 196–199.
94. Сергиенко Е. Н. Индивидуализация как тенденция развития современного производства // Вестник СГТУ. 2008. № 1 (1). С. 167–171.
95. Сидоров А. С. Мониторинг и прогнозирование износа режущего инструмента в мехатронных станочных системах: дис. ... канд. техн. наук: 05.13.06. — Уфимск. гос. авиац. технич. университет, Уфа, 2007 — 177 с.
96. Славянов А. С. Инновационные методы планирования и мониторинга производственных процессов на предприятии в системе ERP / Стратегическое планирование и развитие предприятий. 2014. С. 170–171.
97. Соколов А. Ю. [и др.]. Влияние научно обоснованных технологий переработки пищевого сырья на качество изделий на мясной основе // Товаровед продовольственных товаров. 2019. № 2. С. 63–66.
98. Соломенцев Ю. М. Современное автоматизированное производство в промышленности // Вестник МГТУ «Станкин». 2008. № 4. С. 125–132.
99. Соломенцев Ю. М. [и др.]. Моделирование и оптимизация технологических процессов механической обработки / Ю. М. Соломенцев, В. Г. Митрофанов, О. И. Драчёв, А. В. Капитанов, А. Н. Кравцов, Тольятти: ОНИКС, 2013. 457 с.
100. Соломенцев Ю. М., Митрофанов В. Г., Капитанов А. В. Автоматизированные станочные системы, организация эксплуатации металлообрабатывающих инструментов // Межотраслевая информационная служба. 2012. № 4. С. 48–52.
101. Старшов Д. Г. Совершенствование процессов и аппаратов для приготовления вафельного теста: дис. ... докт. техн. наук: 05.18.12. ВГУИТ, Воронеж, 2015, 2019 — 174 с.
102. Степынин С. С. Цифровой двойник, как инструмент подготовки производства // Сборник тезисов докладов XLIV Международной молодёжной научной конференции “Гагаринские чтения – 2018.” Москва: НИУ МАИ, 2018. С. 245–246.
103. Сушков Ю. А. Аналитические модели систем. Учеб. пособие. / Ю. А. Сушков, СПб.: С.-Петербург. ун-т, 2016. 67 с.
104. Тамазова С. Ю. Совершенствование технологии и разработка рецептуры обогащенного вафельного изделия с применением растительных пищевых добавок: дис. канд. техн. наук: 05.18.01. Кубанск. гос. тех. университет, Краснодар, 2018 — 144 с.
105. Тарасов И. В., Попов Н. А. Индустрия 4.0: трансформация производственных фабрик // «Стратегические решения и риск-менеджмент». 2018. № 3 (106). С. 38–53.
106. Тимирязев, В.А. Схиртладзе, А.Г. Солнышкин Н. П., Дмитриев С. И. Проектирование технологических процессов машиностроительных

- производств: учебник / Н. П. Тимирязев, В.А. Схиртладзе, А.Г. Солнышкин, С. И. Дмитриев, Санкт-Петербург: Лань, 2014. 384 с.
107. Тихомиров В. В. Повышение качества управления технологическими процессами производства на основе процедуры распределенного мониторинга объектов в режиме реального времени с применением инструментов трехмерного моделирования: дис. ... канд. техн. наук: 05.13.06. — МГТУ «Станкин», Москва, 2009 — 158 с.
108. Тихомирова О. Г. Трансформация производственных систем в условиях кастомизации и дигитализации производства / Седьмые Чарновские чтения. Сборник трудов. 2018. С. 95–106.
109. Унжаков Д. Национальная технологическая инициатива // TechNet [Электронный ресурс]. URL: <http://www.nti2035.ru/technology/technet> (дата обращения: 19.01.2018).
110. Федонин О. Н. [и др.]. Модульный подход к созданию металлообрабатывающего оборудования // Вестник РГАТА им. Соловьёва. 2017. № 2 (41). С. 150–156.
111. Фролов Е. Б. Современные концепции управления в производственной логистике MES для дискретного производства – метод вычисляемых приоритетов // САПР и графика. 2015. (11).
112. Ханова А. А., Бондарева И. О., Нестерова, Е.Т. Кинжалиева А. Р. Разработка стратегии цифровой трансформации предприятия // Инженерный вестник Дона. 2021. № № 7 (79). С. 295–303.
113. Холопов В. А. [и др.]. Развитие цифрового машиностроительного производства в концепции Индустрии 4.0 // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2018. № 4. С. 97–103.
114. Холопов В. А. [и др.]. Методы компенсационного подхода в устранении погрешностей обработки деталей по параметрам поверхностей на токарных станках с ЧПУ // Промышленные АСУ и контроллеры. 2019. № 7. С. 19–24.
115. Холопов В. А. [и др.]. Разработка и применение цифрового двойника машиностроительного технологического процесса // Вестник машиностроения. 2019. № 9. С. 37–43.
116. 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.
117. Холопов В. А., Каширская Е. Н., Гусев М. В. Оптимизация конфигурации промышленных Ethernet-сетей на этапе проектирования АСУП // Российский технологический журнал. 2018. № 2 (6). С. 20–31.
118. Холопов В. А., Новосёлов А. В. Интегрированный подход к развитию среднего машиностроительного предприятия // Вестник московского государственного университета приборостроения и информатики. Серия: социально-экономические науки. 2010. № 30. С. 206–217.
119. Черных В. Я. Мониторинг динамики биотехнологических операций производства хлебобулочных изделий // Научно-практическая конференция с международным участием «Усиление конкурентного потенциала пищевых

предприятий путем развития эффективных биотехнологий». Санкт-Петербург - Пушкин, 15–16 сентября. 2016. С. 163–169.

120. Шмелев В. В. Метод мониторинга технологических процессов на основе структурно-логического подхода // Интеллектуальные технологии на транспорте. 2017. № 2. С. 5–14.

121. Юань Т. Автоматизация процесса мониторинга производств предприятий КНР: дис. канд. техн. наук: 05.13.06. — Мос. авт.-дор. гос. тех. университет (МАДИ), Москва, 2013 — 177 с.

122. Ягъев Э. Э. Обеспечение максимальной эффективности мониторинга процесса чистового шлифования на основе анализа параметров состояния технологической системы // Учёные записки КИПУ. 2015. № 1 (49). С. 109–113.

123. Abitova G., Beisenbi M., Nikulin V. Design of modern monitoring systems for efficient control and management of technological processes // Sensors and Smart Structures Technologies for Civil, Mechanical, and Aerospace Systems 2011 / ed. Tomizuka M. 2011. Vol. 7981. P. 79814E.

124. Amdouni A. et al. Monitoring the coefficient of variation using a variable sample size control chart in short production runs // International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2015. № 1–4 (81).

125. Balaji V. et al. Smart manufacturing through sensor based efficiency monitoring system (SBEMS) // Advances in Intelligent Systems and Computing. 2018. V. 614. PP. 34–43.

126. Barricelli B. R., Casiraghi E., Fogli D. A Survey on Digital Twin: Definitions, Characteristics, Applications, and Design Implications // IEEE Access. 2019. (7). PP. 167653–167671.

127. Bityukov V. K., Emelyanov A. E. Improving the management quality of the process control in the food and agricultural industries // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2021. № 6 (640). С. 062023.

128. Blagoveschenskaya M. M., Adnodvortsev A. M. Automated system for calculating and controlling the ratio of incoming raw materials and finished products in confectionery production (a line for the production of chocolate) // Health, Food & Biotechnology. 2021. № 1 (3). PP. 63–74.

129. Budetić F. Praćenje promjena teksturalnih svojstava vafel proizvoda tijekom skladištenja: master's thesis. Strossmayer University of Osijek, Faculty of food technology. Osijek, 2024. — 68 p.

130. Buetfering B. et al. Lean in high variety, low volume production environments – A Literature Review and Maturity Model // EurOMA 2016. 2016. PP. 1–11.

131. Byrne G. et al. High Performance Cutting (HPC) in the New Era of Digital Manufacturing - A Roadmap // Procedia CIRP. 2016. (46). С PP 1–6.

132. Campo R., Ricciardi F., Baldassarre F. The Advent of Industry 4.0 in Manufacturing Industry: Literature Review and Growth Opportunities // DIEM: Dubrovnik International Economic Meeting. 2017. № 1 (3). PP. 632–643.

133. Cao W. et al. Real-time data-driven monitoring in job-shop floor based on radio frequency identification // International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2017. № 5–8 (92). PP. 2099–2120.

134. Caprihan R., Kumar A., Stecke K. E. Evaluation of the impact of information delays on flexible manufacturing systems performance in dynamic scheduling environments // *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2013. № 1–4 (67). PP. 311–338.
135. Cheng Y. et al. Cyber-physical integration for moving digital factories forward towards smart manufacturing: a survey // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2018. № 1–4 (97). PP. 1209–1221.
136. Chinesta F. et al. Virtual, Digital and Hybrid Twins: A New Paradigm in Data-Based Engineering and Engineered Data // *Archives of Computational Methods in Engineering*. 2018. (4). PP. 1–30.
137. Cupek R. et al. “Digital Twins” for Highly Customized Electronic Devices – Case Study on a Rework Operation // *IEEE Access*. 2019. (7). PP. 164127–164143.
138. de-Felipe D., Benedito E. Monitoring high complex production processes using process capability indices // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2017. № 1–4 (93). PP. 1257–1267.
139. Dudek-burlikowska M. Analytical model of technological process correctness and its usage in industrial company // *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*. 2006. № November (15). PP. 107.
140. Durão L. F. C. S. et al. Digital Twin Requirements in the Context of Industry 4.0 // *IFIP International Conference on Product Lifecycle Management*. Springer, Cham, 2018. Vol. 540. PP. 204–214.
141. Frontoni E. et al. Cyber physical systems for Industry 4.0: towards real time virtual reality in smart manufacturing // *International Conference on Augmented Reality, Virtual Reality and Computer Graphics*. 2018. (10851). PP. 422–434.
142. Gdanskii N. I. et al. Control Systems for Dynamic Processes with Single Degree of Freedom with Automatic Adaption of the Structure and Parameters of the System to an External Load // *Chemical and Petroleum Engineering*. 2019. № 7–8 (55). PP. 578–589.
143. Gerbach R. et al. Identification of mechanical defects in MEMS using dynamic measurements for application in production monitoring // *Microsystem Technologies*. 2010. № 7 (16). PP. 1251–1257.
144. Gowtham D. et al. Review on smart manufacturing based on IoT: An Industrial application // *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)*. 2017. PP. 920–923.
145. Guo J. et al. Modular based flexible digital twin for factory design // *Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing*. 2018. № 3 (10). PP. 1–12.
146. Gurianov D. A., Myshenkov K. S., Terekhov V. I. Software Development Methodologies: Analysis and Classification // *2023 5th International Youth Conference on Radio Electronics, Electrical and Power Engineering (REEPE)*. IEEE, 2023. PP. 1–8.
147. Gurjanov A. V. et al. Digitalization of project and production procedures as a tool for instrumentation design automation in Industry 4.0 // *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*. 2017. № 6 (17). PP. 1171–1176.

148. Heo E.-Y. [и др.]. Process Monitoring Technology Based on Virtual Machining // *Procedia Manufacturing*. 2017. № June (11). С. 982–988.
149. Holopov V. et al. Development of digital production engineering monitoring system based on equipment state index // *Proceedings of the 2017 IEEE Russia Section Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering Conference, ElConRus 2017*. 2017. С. 863–868.
150. Ivanov D., Tsipoulanidis A., Schönberger J. Digital Supply Chain, Smart Operations and Industry 4.0 2019. PP. 481–526.
151. Jiang Q., Huang B. Distributed monitoring for large-scale processes based on multivariate statistical analysis and Bayesian method // *Journal of Process Control*. 2016. (46). PP. 75–83.
152. Jianxin Jiao et al. Generic Bill-of-Materials-and-Operations for High-Variety Production Management // *Concurrent Engineering*. 2000. № 4 (8). PP. 297–321.
153. Kacur J., Durdan M., Laciak M. Utilization of the PLC as a web server for remote monitoring of the technological process // *Proceedings of the 2013 14th International Carpathian Control Conference, ICC 2013*. 2013. PP. 144–149.
154. Kang H. S. et al. Smart manufacturing: Past research, present findings, and future directions // *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing - Green Technology*. 2016. № 1 (3). PP. 111–128.
155. Karkoszka T. Operational monitoring in the technological process in the aspect of occupational risk // *Procedia Manufacturing*. 2017. (13). PP. 1463–1469.
156. Kashirskaya E. N. et al. Methodology for assessing the implementation of the production process / *Proceedings of 2017 IEEE 2nd International Conference on Control in Technical Systems, CTS 2017*. 2017. PP. 232–235.
157. Kashirskaya E. N. et al. Simulation model for monitoring the execution of technological processes // *Proceedings of 2017 IEEE 2nd International Conference on Control in Technical Systems, CTS 2017*. 2017. PP. 307–310.
158. Kashirskaya E. N. et al. Transient oscillatory processes at the balancing device operation of abrasive wheel grinder // *Journal of Physics: Conference Series*. 2020. № 2 (1679). P. 022070.
159. Kashirskaya E. N., Antonov S. V., Ganichev I. A. The Dynamic Model of Unbalanced Grinding Wheel 2022. PP. 477–485.
160. Katic M., Agarwal R. The Flexibility Paradox: Achieving Ambidexterity in High-Variety, Low-Volume Manufacturing // *Global Journal of Flexible Systems Management*. 2018. № S1 (19). PP. 69–86.
161. Keshari A. Advanced Techniques for Monitoring, Simulation and Optimization of Machining Processes. PHD thesis. 2011.
162. Kholopov V. A. et al. Development of Digital Machine-Building Production in the Industry 4.0 Concept // *Journal of Machinery Manufacture and Reliability*. 2018. № 4 (47). PP. 380–385.
163. Kholopov V. A. et al. An Intelligent Monitoring System for Execution of Machine Engineering Processes // *Journal of Machinery Manufacture and Reliability*. 2019. № 5 (48). PP. 464–475.

164. 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 IEEE, 2019. PP. 1–5.
165. Kinik D. et al. On-line praćenje tehnološkog postupka rezanja materijala abrazivnim vodenim mlazom // Tehnicki Vjesnik. 2015. № 2 (22). PP. 351–357.
166. Krasinsky A., Yuldashev A. Mathematical and Computer Modeling of a New Type of Two-Link Manipulator / 2019 1st International Conference on Control Systems, Mathematical Modelling, Automation and Energy Efficiency (SUMMA). IEEE, 2019. PP. 51–55.
167. Kritzinger W. et al. Digital Twin in manufacturing: A categorical literature review and classification // IFAC-PapersOnLine. 2018. № 11 (51). PP. 1016–1022.
168. Leng J. et al. Digital twin-driven manufacturing cyber-physical system for parallel controlling of smart workshop // Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing. 2018. № 3 (10). PP. 1–12.
169. Li D. et al. A big data enabled load-balancing control for smart manufacturing of Industry 4.0 // Cluster Computing. 2017. № 2 (20). PP. 1855–1864.
170. Li X. H., Li W. Y. The Research on Intelligent Monitoring Technology of NC Machining Process // Procedia CIRP. 2016. (56). PP. 556–560.
171. Liu C. et al. Smart manufacturing systems for Industry 4.0: Conceptual framework, scenarios, and future perspectives // Frontiers of Mechanical Engineering. 2018. № 2 (13). PP. 137–150.
172. Loginov A. et al. Method of storing information on engineering product composition // Proceedings of Irkutsk State Technical University. 2018. № 10 (22). PP. 38–45.
173. Mabkhot M. et al. Requirements of the Smart Factory System: A Survey and Perspective // Machines. 2018. № 2 (6). PP. 23.
174. Marodin G. A. et al. How context factors influence lean production practices in manufacturing cells // International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2015. № 5–8 (79). PP. 1389–1399.
175. Mittal S. et al. Smart manufacturing: Characteristics, technologies and enabling factors // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture. 2019. № 5 (233). PP. 1342–1361.
176. Mleczko J., Dulina L. Manufacturing Documentation for the High-Variety Products // Management and Production Engineering Review. 2014. № 3 (5). PP. 53–61.
177. Modoni G. E. et al. Synchronizing physical and digital factory: Benefits and technical challenges // Procedia CIRP. 2019. (79). PP. 472–477.
178. Morgan J., O'Donnell G. E. Cyber physical process monitoring systems // Journal of Intelligent Manufacturing. 2018. № 6 (29). PP. 1317–1328.
179. Mori M., Fujishima M. Remote monitoring and maintenance system for CNC machine tools // Procedia CIRP. 2013. (12). PP. 7–12.
180. Mueller E., Chen X.-L., Riedel R. Challenges and Requirements for the Application of Industry 4.0: A Special Insight with the Usage of Cyber-Physical System // Chinese Journal of Mechanical Engineering. 2017. № 5 (30). PP. 1050–1057.

181. Negri E., Fumagalli L., Macchi M. A Review of the Roles of Digital Twin in CPS-based Production Systems // *Procedia Manufacturing*. 2017. № June (11). PP. 939–948.
182. O'Donovan P. et al. An industrial big data pipeline for data-driven analytics maintenance applications in large-scale smart manufacturing facilities // *Journal of Big Data*. 2015. № 1 (2). PP. 1–26.
183. Pacaux-Lemoine M. P. et al. Designing intelligent manufacturing systems through Human-Machine Cooperation principles: A human-centered approach // *Computers and Industrial Engineering*. 2017. (111). PP. 581–595.
184. Padovano A. et al. A Digital Twin based Service Oriented Application for a 4.0 Knowledge Navigation in the Smart Factory // *IFAC-PapersOnLine*. 2018. № 11 (51). PP. 631–636.
185. Peng K., Wang B., Dong J. An Efficient Quality-Related Fault Diagnosis Method for Real-Time Multimode Industrial Process // *Journal of Control Science and Engineering*. 2017. (2017).
186. Petrov A. Simulation as the basis of digital twin technology // *Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2018. № 10 (22). PP. 56–66.
187. Pirttioja T. Applying Agent Technology To Constructing Flexible Monitoring Systems in Process. Doctor thesis. 2008.
188. Porter M. E., Heppelmann J. E. How Smart, Connected Products Are Transforming Companies // *Harvard business review*. 2014. № 11 (92). PP. 64–88.
189. Razhivina M. et al. Features of information support processes integration of organization and management in the RF machine-building complex // *Procedia Engineering*. 2016. (149). PP. 421–424.
190. Rusinov L. A., Rudakova I. V., Kurkina V. V. Real time diagnostics of technological processes and field equipment // *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*. 2007. № 1 (88). PP. 18–25.
191. Slim R., Rémy H., Amadou C. Convergence and contradiction between lean and Industry 4.0 for inventive design of smart production systems // *International TRIZ Future Conference*. 2018. (541). PP. 141–153.
192. Stark R., Fresemann C., Lindow K. Development and operation of Digital Twins for technical systems and services // *CIRP Annals*. 2019. № 1 (68). PP. 129–132.
193. Stroiteleva T. G. et al. Peculiarities and Problems of Formation of Industry 4.0 in Modern Russia / *Studies in Systems, Decision and Control*. 2019. PP. 145–153.
194. Stump B., Badurdeen F. Integrating lean and other strategies for mass customization manufacturing: a case study // *Journal of Intelligent Manufacturing*. 2012. № 1 (23). PP. 109–124.
195. Sukhov Y. T., Matiushin I. V. Development of information-measuring channels of the monitoring system of quality cut for technological process laser cutting of materials // *Laser-Assisted Microtechnology 2000*. 2001. (4157). PP. 88–92.

196. Tao F. et al. Digital twin-driven product design, manufacturing and service with big data // *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2018. № 9–12 (94). PP. 3563–3576.
197. Tarallo A. et al. A cyber-physical system for production monitoring of manual manufacturing processes // *International Journal on Interactive Design and Manufacturing*. 2018. № 4 (12). PP. 1235–1241.
198. Thoben K. D., Wiesner S. A., Wuest T. “Industrie 4.0” and smart manufacturing-a review of research issues and application examples // *International Journal of Automation Technology*. 2017. № 1 (11). PP. 4–16.
199. Trojanowska J. et al. A Methodology of improvement of manufacturing productivity through increasing operational efficiency of the production process 2018. PP. 23–32.
200. Tupa J., Simota J., Steiner F. Aspects of risk management implementation for Industry 4.0 // *Procedia Manufacturing*. 2017. № June (11). PP. 1223–1230.
201. Wang S. et al. Cloud-based smart manufacturing for personalized candy packing application // *Journal of Supercomputing*. 2018. № 9 (74). PP. 4339–4357.
202. Weinberger N. et al. A new monitoring process of future topics for innovation and technological analysis: informing Germanys’ innovation policy // *European Journal of Futures Research*. 2013. № 1 (1). PP. 1–9.
203. Xie J. et al. Virtual monitoring method for hydraulic supports based on digital twin theory // *Mining Technology: Transactions of the Institute of Mining and Metallurgy*. 2019. № 2 (128). PP. 77–87.
204. Xu X. Machine Tool 4.0 for the new era of manufacturing // *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2017. № 5–8 (92). PP. 1893–1900.
205. Yao X. et al. Smart manufacturing based on cyber-physical systems and beyond // *Journal of Intelligent Manufacturing*. 2019. № 8 (30). PP. 2805–2817.
206. Yin S., Ding S. X., Zhou D. Diagnosis and Prognosis for Complicated Industrial Systems-Part I // *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 2016. № 5 (63). PP. 3201–3204.
207. Yin S., Ding S. X., Zhou D. Diagnosis and Prognosis for Complicated Industrial Systems—Part II // *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 2016. № 5 (63). PP. 3201–3204.
208. Zarubin S. G., Deev K. A. Process Model of Digital Manufacturing // *Russian Engineering Research*. 2017. № 8 (37). PP. 714–719.
209. Zhang J. et al. A new contouring error estimation for the high form accuracy of a multi-axis CNC machine tool // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2019. № 5–8 (101). PP. 1403–1421.
210. Zhang Q. et al. Modeling of Digital Twin Workshop Based on Perception Data Springer, Cham, 2017. PP. 3–14.
211. Zhang B., Shin Y. C. A multimodal intelligent monitoring system for turning processes // *Journal of Manufacturing Processes*. 2018. (35). C. 547–558.
212. Zhang R. et al. Research on an Intelligent Manufacturing System for Tokamak Machine // *Journal of Fusion Energy*. 2014. № 6 (33). PP. 648–652.

213. Zhang Z. et al. A simulation-based approach for plant layout design and production planning // Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing. 2019. № 3 (10). PP. 1217–1230.
214. Zhong R. Y., Wang L., Xu X. An IoT-enabled Real-time Machine Status Monitoring Approach for Cloud Manufacturing // Procedia CIRP. 2017. (63). PP. 709–714.
215. Zhuang C., Liu J., Xiong H. Digital twin-based smart production management and control framework for the complex product assembly shop-floor // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2018. № 1–4 (96). PP. 1149–1163.
216. Zhuang C., Liu J., Xiong H. Digital twin-based smart production management and control framework for the complex product assembly shop-floor // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2018. № 1–4 (96). PP. 1149–1163.
217. Patent US 2005/0228511 A1 Computer-implemented system and method for measuring and improving manufacturing processes and maximizing product research and development speed and efficiency. Oct. 13, 2005.
218. Patent US 2012/0184582 A1 Use of prediction data in monitoring actual production targets Sep. 9, 2010.
219. Патент РФ № 2435188 С1 Многоуровневая автоматизированная система управления производственно-технологическими процессами с управлением затратами на основе мониторинга, анализа и прогноза состояния технологической инфраструктуры нефтегазодобывающего предприятия. 27.11.2011.
220. Patent US 007035877B2 Quality management and intelligent manufacturing with labels and smart tags in event-based product manufacturing Apr. 25, 2006.
221. ГОСТ 3.1404 – 86 Единая система технологической документации. Формы и правила оформления документов на технологические процессы и операции обработки резанием [Текст] М.: ИПК Издательство стандартов, 2003. 216 с.
222. ГОСТ 2.610-2006 Единая система конструкторской документации (ЕСКД). Правила выполнения эксплуатационных документов (Издание с Поправкой) М.: Стандартинформ, 2008.
223. ГОСТ 2.601-2006 Единая система конструкторской документации (ЕСКД). Эксплуатационные документы (Издание с Поправкой) М.: Стандартинформ, 2008.
224. Внедрение и развитие Индустрии 4.0. Основы, моделирование и примеры из практики под ред. А. Рот, Москва: Техносфера, 2017. 294 с.
225. Positive Technologies // Positive Technologies выпустила первую в мире бесплатную систему мониторинга безопасности АСУ ТП [Электронный ресурс]. URL: <https://www.ptsecurity.com/ru-ru/about/news/positive-technologies-vypustila-pervuyu-v-mire-besplatnuyu-sistemu-monitoringa-bezopasnosti-asu-tp/> (дата обращения: 05.05.2020).

226. Группа «Борлас» // Система мониторинга технологических процессов сельскохозяйственного производства [Электронный ресурс]. URL: <https://borlas.ru/> (дата обращения: 13.05.2020).
227. Распоряжение Правительства РФ от 06.11.2021 г. N 3142-р «Об утверждении стратегического направления в области цифровой трансформации обрабатывающих отраслей промышленности» // 2021.
228. ГОСТ Р 2.105-2019 Единая система конструкторской документации (ЕСКД). Общие требования к текстовым документам (Издание с Изменением N 1) М.: Стандартинформ, 2021.
229. Постановление Правительства РФ от 15 апреля 2014 г. N 328 «Об утверждении государственной программы Российской Федерации «Развитие промышленности и повышение ее конкурентоспособности.» 2014. 190 с.
230. ПНИЭР RFMEFI58016X0008 «Разработка информационно-программных средств для автоматизации управления высокотехнологичным оборудованием в условиях цифрового машиностроительного производства».

ПРИЛОЖЕНИЕ 1

АКТ ВНЕДРЕНИЯ

результатов диссертационной работы старшего преподавателя
ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет»
Антонова Сергея Валерьевича по теме
«Разработка методов и алгоритмов автоматизированного мониторинга
технологических процессов производства вафель»

Настоящий акт подтверждает, что основные результаты диссертационной работы старшего преподавателя кафедры промышленной информатики Института искусственного интеллекта ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» Антонова Сергея Валерьевича на тему «Разработка методов и алгоритмов автоматизированного мониторинга технологических процессов производства вафель» использованы в практической деятельности технических подразделений предприятий холдинга «Объединенные кондитеры».

Разработанные методы и алгоритмы автоматизированного мониторинга технологических процессов, предложенные в работе, были апробированы на действующей линии по производству вафель, отработана оптимизация рецептурных компонентов, позволили получить сокращение материальных издержек, переданы на ОАО «РОТ ФРОНТ» (входит в холдинг «Объединённые кондитеры») для последующего внедрения.

Директор департамента технической
политики и инноваций

Головин

Головин В.В.

23.02.24

Подпись Головина В.В. заверяю:

НАЧАЛЬНИК
ОТДЕЛА КАДРОВ
ДЕМИДОВА Ю В



Контактные данные:

Адрес: 115184, Москва, 2-й Новокузнецкий пер., 13/15, стр. 1

Тел.: +7 (495) 228 08 22

ПРИЛОЖЕНИЕ 2

АКТ

внедрения результатов диссертационной работы старшего преподавателя
ФГБОУ ВО «МИРЭА — Российский технологический университет»
Антонова Сергея Валерьевича по теме
«Разработка методов и алгоритмов автоматизированного контроля
технологических процессов производства вафель на основе цифрового
двойника»

ООО «ВЕКАС» осуществляет полный цикл проектирования: составление технического задания, обследование производства, разработка проектной и рабочей документации, разработка программного обеспечения, монтаж и пусконаладка, дальнейшее сопровождение системы. Компания «ВЕКАС» предлагает решения в областях системной интеграции, SCADA, баз данных, систем ведения отчётности, машинного зрения и других в отраслях пищевого производства, фармацевтики и автоматизации зданий.

Предложенная Антоновым С.В. в его диссертационной работе методика создания обеспечивающих подсистем на базе SCADA и других традиционных средств автоматизации технологических процессов кондитерской отрасли с целью повышения эффективности мониторинга и обеспечения цифровой трансформации предприятий имеет большую практическую значимость и интерес для нашей Компании.

ООО «ВЕКАС» подтверждает факт и целесообразность внедрения результатов диссертационной работы Антонова С.В. «Разработка методов и алгоритмов автоматизированного контроля технологических процессов производства вафель на основе цифрового двойника» в предлагаемых Компанией решениях.

Генеральный директор



Космин А.С.
11.02.2024

Контактные данные:

Адрес: 111020, г. Москва, ул. Синичкина 2-я, д. 9а, стр. 10, офис 10 (БЦ
Синица Плаза)

Телефон: +7 (499) 322-11-54

ПРИЛОЖЕНИЕ 3



ООО «ЭлитМатик»
Москва, Огородный проезд, 16/1,
стр. 3
(Останкино Бизнес Парк)
Тел.: +7 (916) 523 87 68
e-mail: info@elitematic.ru
www.EliteRobots.ru
www.IRAYPLE.ru

Промышленная автоматизация | Роботы | Техническое зрение

АКТ

внедрения результатов диссертационной работы старшего преподавателя кафедры промышленной информатики ФГБОУ ВО «РТУ МИРЭА» ФГБОУ ВО «МИРЭА — Российский технологический университет» Антонова Сергея Валерьевича по теме «Разработка методов и алгоритмов автоматизированного контроля технологических процессов производства вафель на основе цифрового двойника»

Настоящий акт подтверждает, что результаты диссертационной работы Антонова Сергея Валерьевича на тему «Разработка методов и алгоритмов автоматизированного контроля технологических процессов производства вафель на основе цифрового двойника», а именно

— функциональные и алгоритмические технологии и методы фиксации параметров и ресурсного обеспечения при мониторинге технологических процессов производства вафель на основе цифровых двойников,

— методы эффективной организации и ведения специализированного информационного обеспечения АСУ ТП на всех стадиях жизненного цикла изделий использованы внедрены в ходе выполнения работ ООО «ЭлитМатик».

Генеральный директор ООО «ЭлитМатик»
Кандидат технических наук




А.В. Бунеев
16.01.2024

ПРИЛОЖЕНИЕ 4



УТВЕРЖДАЮ

Проректор по учебной работе
ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский
технологический университет»

д.т.н., проф.

А. В. Тимошенко

« 14 » *апреля* 2024 г.

АКТ

использования в учебном процессе результатов
кандидатской диссертации Антонова С.В. на тему
«Разработка методов и алгоритмов автоматизированного контроля
технологических процессов производства вафель на основе цифрового
двойника»

Результаты диссертационного исследования Антонова С.В. на соискание учёной степени кандидата технических наук используются в учебном процессе для студентов по программам высшего образования в магистратуре по направлениям 15.04.04 «Автоматизация технологических процессов и производств» и 09.04.01 «Информатика и вычислительная техника», реализуемым на кафедре промышленной информатики Института искусственного интеллекта ФГБОУ ВО «МИРЭА — Российский технологический университет», внедрены в рабочие программы дисциплин: «Проектирование автоматизированных систем умного производства», «Умные производственные системы», «Проектирование информационно-управляющих систем умного производств» и «Архитектура информационно-управляющей системы умного производства», применяются в процессе подготовки выпускных квалификационных работ. Результаты диссертационной работы вошли в следующие методические пособия: «Проектирование систем автоматизации и управления / В. А. Холопов, С. В. Антонов. — М.: РТУ МИРЭА, 2020, 73 с.» и «Проектирование систем автоматизации и управления. Ч. 3 / С. В. Антонов. — М.: РТУ МИРЭА, 2023, 67 с.».

Зав. кафедрой
промышленной информатики
к.т.н., доцент


В.А. Холопов

ПРИЛОЖЕНИЕ 5

Таблица 1 — Статистические данные по браку на АО «Станкопресс»

№ п/п	Наименование	Материал	Партия	Количество деталей	Кол-во брак. деталей	Доля брака	Мат. ожидание по доле брака	Дисперсия, % ²	Ср. квадр. отклонение
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	Кольцо коромысла стального нижнее	Стали 3 ГОСТ 535-88	1	40	6	15,0%	14,2%	2,83	1,68%
			2	40	5	12,5%			
			3	60	10	16,7%			
			4	20	3	15,0%			
			5	25	4	16,0%			
			6	45	6	13,3%			
			7	50	6	12,0%			
			8	30	4	13,3%			
2	Вал ротора 1-ой и 2-ой осей	20X13 ГОСТ 4543-71	1	30	4	13,3%	14,3%	0,89	0,94%
			2	20	3	15,0%			
			3	30	4	13,3%			
			4	45	7	15,6%			
			5	70	10	14,3%			
			6	60	8	13,3%			
			7	20	3	15,0%			
3	Перемычка коромысла	09Г2С ГОСТ 19281-89	1	60	9	15,0%	13,6%	5,92	2,43%
			2	20	3	15,0%			
			3	10	1	10,0%			
			4	55	8	14,5%			
4	Коромысло крышка верхняя	Д16 ГОСТ 4784-97	1	25	4	16,0%	14,0%	3,17	1,78%
			2	40	6	15,0%			
			3	45	7	15,6%			
			4	25	3	12,0%			
			5	25	3	12,0%			
			6	30	4	13,3%			