

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования «Уральский федеральный университет
имени первого Президента России Б.Н. Ельцина»

На правах рукописи



Бильданов Радий Газембякович

**СРЕДСТВА ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ
ДЛЯ АВТОМАТИЗАЦИИ И УПРАВЛЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ
ПРОЦЕССАМИ ПРОИЗВОДСТВА РАДИОФАРМАЦЕВТИЧЕСКИХ
ЛЕКАРСТВЕННЫХ ПРЕПАРАТОВ**

2.3.3. Автоматизация и управление технологическими процессами
и производствами

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

Екатеринбург – 2024

Работа выполнена в конструкторском бюро Научно-исследовательского технологического института им С. П. Капицы федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Ульяновский государственный университет».

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор,
Смагин Алексей Аркадьевич

Официальные оппоненты: **Клячкин Владимир Николаевич,**
доктор технических наук, профессор,
ФГБОУ ВО «Ульяновский государственный
технический университет», профессор кафедры
«Прикладная математика и информатика»;

Горюнов Алексей Германович,
доктор технических наук, доцент,
ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский
Томский политехнический университет»,
заведующий кафедрой - руководитель Отделения
ядерно-топливного цикла на правах кафедры
Инженерной школы ядерных технологий;

Красильников Александр Яковлевич,
доктор технических наук, старший научный
сотрудник, ООО «ПОЗ-Прогресс» (г. Верхняя
Пышма), инженер-конструктор

Защита состоится «13» февраля 2024 года в 14:00 ч на заседании диссертационного совета УрФУ 2.3.11.30 по адресу: 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, д. 19, ауд. И-420 (зал Ученого совета).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», адрес объявления на сайте УрФУ:

<https://dissovet2.urfu.ru/mod/data/view.php?d=12&rid=5591>

Автореферат разослан « ____ » _____

Ученый секретарь
диссертационного совета



Уколов Станислав Сергеевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. В последние годы активно развиваются и внедряются в практику технологии ядерной медицины, использующей медицинские изотопы для диагностики и терапии онкозаболеваний. Эти технологии предполагают применение радиофармацевтических лекарственных препаратов (далее – РФЛП), содержащих открытые радионуклидные источники и молекулярные векторы, которые адресно доставляют радионуклиды до онкологических клеток¹⁾.

Специфику производства РФЛП определяет ряд их особых характеристик, в частности малый объем серии РФЛП, многосменное и рутинное производство, выпуск к конкретному сроку и индивидуально для пациента, короткий жизненный цикл РФЛП (срок годности / хранения), их использование для пациента до завершения контроля качества, высокие требования к качеству препаратов (стерильность, химическая, радиохимическая и радионуклидная чистота и др.). Перечисленные особенности необходимо учитывать при управлении производствами, занимающимися изготовлением РФЛП для центров ядерной медицины²⁾. В связи с этим в целях достижения гарантированного качества препаратов и обеспечения безопасности персонала к производству и технологиям получения РФЛП, а также к персоналу производства и лаборатории качества предъявляются особые требования^{3, 4, 5)}.

Показатели качества функционирования любого технологического процесса (далее – ТП) напрямую зависят от его соответствия требованиям используемой технологии и технологической среды производства, в которой существуют случайные факторы, влияющие на его контролируемые параметры и характеристики. В этой связи в целях минимизации временных и материальных производственных затрат, как правило, моделируются и разрабатываются организационно-производственные подходы, позволяющие прогнозировать и локализовать сбойные технологические операции, а также осуществлять возвраты на предыдущие технологические операции, некорректное выполнение которых служит первопричиной сбоя⁶⁾. Важно также отме-

¹⁾Zimmermann, R. Nuclear Medicine: Radioactivity for Diagnosis and Therapy = La Médecine nucléaire. La radioactivité au service du diagnostic et de la thérapie / R. Zimmermann. – Лез-Юлис : EDP Sciences, 2007. – 173 p.

²⁾ГОСТ Р 52249-2009. Национальный стандарт Российской Федерации. Правила производства и контроля качества лекарственных средств. – Электронный фонд правовых и нормативно-технических документов. АО «Кодекс», 2021.

³⁾Кодина, Г. Е. Основные проблемы обеспечения качества радиофармацевтических лекарственных препаратов / Г. Е. Кодина, А. О. Малышева // Вестник Научного центра экспертизы средств медицинского применения. Регуляторные исследования и экспертиза лекарственных средств. – 2019. – Т. 9, № 4. – С. 216-230.

⁴⁾Антропов, С. Ю. Обеспечение достоверности измерений радиохимической чистоты радиофармацевтических препаратов методом сканирования тонкослойных хроматограмм / С. Ю. Антропов, Н. С. Божко, С. В. Коростин // Измерительная техника. – 2013. – № 10. – С. 60-65.

⁵⁾Elsinga P. et al. Guidance on current good radiopharmacy practice (cGRPP) for the small-scale preparation of radiopharmaceuticals //European journal of nuclear medicine and molecular imaging. – 2010. – Т. 37. – С. 1049-1062.

⁶⁾Кодина, Г. Е. Методы получения радиофармацевтических препаратов и радионуклидных генераторов для ядерной медицины : Учебное пособие для вузов / Г. Е. Кодина, Р. Н. Красикова. – Москва : Издательский дом МЭИ, 2014. – 281 с.

тить, что технологический процесс производства РФЛП носит человеко-машинный характер и предполагает связанные с этим ошибки, негативно влияющие на качество продукции ⁷⁾.

Учитывая быстрорастущую потребность в России в качественных РФЛП, потребности и запросы центров ядерной медицины, а также недостаток работ, посвященных разрабатываемой теме, становится очевидной актуальность настоящей диссертационной работы, необходимость дальнейшего научно обоснованного сопровождения ТП производства РФЛП и создания средств автоматизации, обеспечивающих их качество.

Степень разработанности. Обзор имеющихся инструментальных средств фармацевтических систем качества и управления ими показал наличие как российских, так и зарубежных программных решений, в том числе Акелон GxP (Акелон); EDMS Amplexor (Amplexor); TrackWise Digital (Sparta); Plant iT (ProLeiT); WSSDocs (WSS-Consulting, Москва). Все они обеспечивают надлежащее внедрение и бесперебойное функционирование фармацевтических систем качества через постоянный мониторинг качества выпускаемых РФЛП и регистрацию их партий в системах хранения информации, что в полной мере соответствует требованиям GMP к производству РФЛП. Однако ни одно из известных решений не учитывает ключевую специфику связи производства РФЛП и их использования для пациентов, а именно уведомления о качестве произведенной партии РФЛП для своевременного оказания приехавшим в медицинский центр онкобольным радионуклидной терапии. Также данные программные решения не учитывают требования к обращению РФЛП на всех стадиях их жизненного цикла с точки зрения соблюдения норм и правил радиационной безопасности.

С учетом сказанного и для решения указанного ключевого вопроса представляется обоснованным создание подходов и моделей технологического процесса производства РФЛП, учитывающих превентивную проверку выполнения этапов и операций производства РФЛП, а также создание на их основе соответствующей информационной системы.

Объект исследования: методы моделирования и формализованного описания сложных производственно-технологических систем для их управления и автоматизации.

Предмет исследования: модели, онтологические средства имитационного моделирования, алгоритмы автоматизации, программные решения для создания условий выполнения требований используемой технологии создания РФЛП.

Целью диссертационной работы является разработка и исследование новых моделей, онтологических средств имитационного моделирования и алгоритмов автоматизации, контроля и управления обеспечения заданных параметров качества РФЛП.

Для достижения поставленной цели решаются следующие **задачи**:

⁷⁾Maioli C. et al. Quality control on radiochemical purity in Technetium-99m radiopharmaceuticals labelling: three years of experience on 2280 procedures //Acta Bio Medica: Atenei Parmensis. – 2017. – Т. 88. – №. 1. – С. 49-56.

1. Разработка подхода к моделированию ТП производства РФЛП, позволяющего проводить исследования текущих состояний ТП и управление ими для выявления сбойных ситуаций, локализации мест нарушения хода ТП и принятия решений в режимах контроля исполнения операций, а также на стадиях подготовки производства.

2. Разработка структурно-функциональной модели, позволяющей описывать состав, структуру и функциональность ТП с целью изучения его технологических свойств, получения формализованного описания ТП для проведения моделирования этапов функционирования и управления в различных производственных режимах.

3. Разработка вероятностно-статистической модели ТП, позволяющей описывать поведенческие свойства ТП в реальных условиях, исследовать его в предельных режимах функционирования и в целом управлять им, а также оценивать возможные риски и устанавливать причины возникновения сбоя, на основе которых можно определить факторы, отрицательно влияющие на качество производимых РФЛП.

4. Разработка онтологических средств поддержки имитационного моделирования и управления производством РФЛП, включающих в себя данные о режимах штатного и нештатного функционирования ТП, описание возможных ситуаций сбоя и отказов оборудования, причин их возникновения, особенностей среды производственного процесса, основных технологических требований к качеству РФЛП и препаратов, из которых они изготавливаются, профессионально-исполнительских особенностей персонала.

5. Разработка программных процедур матричной обработки множества контрольных показателей во время исполнения ТП, которая дает возможности оперативной оценки его состояния и в случае сбоя – возвратного перехода на одну из предыдущих технологических операций.

Научная новизна заключается в разработке теоретических основ исследования и управления ТП производства РФЛП с использованием вероятностно-статистического моделирования режимов анализа появления сбойных ситуаций, причин и локализации мест сбоя и создания средств быстрых восстановительных работ, в частности в разработке:

– подхода к моделированию ТП производства РФЛП в ситуациях, близких к производственным условиям, на основе введения аддитивной вероятностной составляющей в начальное вероятностное распределение рисков технологических операций для выявления мест операций, имеющих наибольшие вероятности сбоя или отказа;

– структурно-функциональной модели ТП, определяющей состав, структуру, функциональность ТП, позволяющей создавать средства подробного описания составных компонентов и их связей и строить на ее основе универсальное представление структур ТП при введении нового содержания технологий производства РФЛП;

– вероятностно-статистической модели поведенческих свойств ТП как вероятностного автомата, который включает в себя множество состояний, интерпретирующих технологические операции, множество входов и выходов на каждом шаге исполнения процесса, множество переходов по производственной цепочке операций, вероятностное распределение рисков по каждой операции, что дает возможность корректного описания ТП и проведения имитационного моделирования;

– онтологии производства РФЛП, которая позволила создать онтологические средства поддержки имитационного моделирования и управления производством РФЛП, включающие в себя модели ТП и базу прецедентов ТП, описание возможных ситуаций сбоя и отказов оборудования, причин их возникновения, особенностей среды производственного процесса, основных технологических требований к качеству РФЛП и препаратов, из которых они изготавливаются, и профессиональных требований к исполнительскому персоналу;

– программных процедур матричной обработки множества контрольных показателей функционирования ТП для уменьшения времени производства РФЛП, что имеет важное значение для выполнения требования изготовления «точно вовремя»;

– комплекса программных средств – имитатора для моделирования режимов работы ТП, анализа и обработки контролируемых параметров, рисков, для выявления наиболее уязвимых состояний ТП, оценки качества РФЛП, процедур восстановления ТП в случае сбоев.

Теоретическая значимость состоит в разработке подхода и средств автоматизации контроля и управления технологическими процессами производства РФЛП. Комплекс моделей технологического процесса и применение имитационного моделирования в условиях, отвечающих его протеканиям в реальных производственных средах, дает возможность изучения аналогичных ТП как сложных производственных процессов, отличающихся большой разнородностью выполняемых операций, человеко-машинным способом их проведения, использованием высокотехнологичного оборудования и ограниченностью сроков их исполнения, что позволяет на практике осуществлять предварительную диагностику рисков и идентификацию сбойных ситуаций, при воздействии отрицательно влияющих внутренних и внешних факторов.

Практическая значимость результатов работы заключается в использовании полученных новых теоретических и прикладных научных результатов, качестве методов и средств управления и автоматизации ТП производства РФЛП для достижения высокого качества лекарственной продукции и минимизации временных и ресурсных производственных потерь. Полученные с помощью разработанных моделей модели поведения производства и управления им результаты могут быть использованы как исходные данные для:

– оценки поведения состояний ТП в реальных условиях производства;

– проведения имитационного моделирования для определения показателей качества продукции при работе производства в штатных и нештатных ситуациях, а также оптимизации временных и материальных потерь при сохранении требуемого качества производимых РФЛП в пределах используемой технологии;

– варьирования параметрами процессов моделирования ТП на предварительном этапе подготовки производства с целью выявления уязвимых мест ТП или принятия оперативных мер в ходе выполнения реального ТП;

– использования разработанных онтологических средств обеспечения подготовки и проведения моделирования производственных событий и возможностей принятия обоснованных управленческих решений в ходе реструктурирования последовательности состояний ТП в случае возникновения сбойных ситуаций;

– анализа, управления ТП в режиме реального времени и создания баз прецедентов производственных событий.

Научные и прикладные результаты диссертационной работы внедрены на производстве радиофармацевтических предшественников в АО «ГНЦ НИИАР», г. Димитровград (Акт о внедрении № 21-02/11 от 10.05.2023 г.) и на производстве радиофармпрепаратов в ООО «Медицина и ядерные технологии», г. Москва (Акт о внедрении б/н от 14.07.2023 г.).

Положения, выносимые на защиту:

1. Предложен подход к имитационному моделированию ТП производства РФЛП на основе комплекса разработанных моделей ТП на параметрическом, структурно-функциональном, вероятностно-стохастическом уровнях с использованием разработанной онтологии производства РФЛП, позволяющего проводить исследования текущих состояний ТП и автоматизированное управление для выявления сбойных ситуаций, локализации мест нарушения хода ТП и принятия решений в режимах контроля исполнения операций, а также на стадиях подготовки производства.

2. На основе статистических апостериорных вероятностей данных, полученных в ходе изготовления большого количества партий РФЛП, разработана вероятностно-статистическая модель технологического процесса производства РФЛП как решение уравнения регрессии в виде полинома 6-й степени, которое описывает поведенческие свойства ТП с необходимой точностью и позволяет на ее основе построить систему имитационного моделирования ТП для анализа, контроля и управления его параметров в штатных и нештатных режимах.

3. Использование вероятностно-статистической модели ТП дает возможность рассматривать производственные ситуации, связанные с их неопределенностью путем совместного распределения вероятностей на все наблюдаемые и скрытые переменные, что позволяет моделировать реальный процесс с точки зрения анализа критических ситуаций, в которых он может находиться в результате сбоя (или отказа) операций, возникающего вследствие отрицательного влияния факторов.

4. Разработанная онтология производства РФЛП позволила создать онтологические средства поддержки имитационного моделирования и управления производством РФЛП, содержащие модели ТП и базу прецедентов ТП, описание возможных ситуаций со сбоем и отказами оборудования, причин их возникновения, особенностей среды производственного процесса, основных технологических требований к качеству РФЛП и препаратов, из которых они изготавливаются, и профессиональных требований к исполнителям ТП.

5. Комплекс программных средств – имитатор для моделирования режимов работы ТП, анализа и обработки контролируемых параметров, рисков, для выявления наиболее уязвимых состояний ТП, оценки качества РФЛП, процедур восстановления ТП в случае сбоев.

6. Разработанные программные процедуры матричной обработки контрольных показателей исполнения ТП дают возможность оперативной оценки этих показателей, уменьшения временных затрат на производство РФЛП, что имеет важное значение для выполнения требования изготовления «точно вовремя».

Достоверность результатов разработки нового подхода к исследованию и управлению технологическими процессами производства РФЛП обеспечивается корректностью применения математического аппарата и строгостью постановок задач. Достоверность также подтверждается проведенными компьютерными экспериментами и результатами тестирования разработанного программного комплекса.

Методы исследования. В ходе исследования применялись системный анализ, теория вероятностей и математическая статистика, функциональный анализ и теория функций, регрессионный анализ. В процессе разработки математических моделей и алгоритмов использовались методы группировки и анализа статистических данных, вычислительные методы интерполяции и аппроксимации, проектирования информационных систем.

Личный вклад автора. Основные положения, теоретические выводы и рекомендации, практическая часть получены соискателем самостоятельно. В работах, выполненных в соавторстве, автору принадлежит постановка задач, методы их решения и результаты экспериментальных исследований.

Апробация работы. Основные положения и результаты работы доложены на III Международной конференции «Резервы повышения эффективности деятельности в бережливых организациях» (Ижевск, 2017), V Всероссийской конференции с международным участием «Техническое регулирование в едином экономическом пространстве» (Екатеринбург, 2018), II Международной конференции ученых «Роль технического регулирования и стандартизации в эпоху цифровой экономики» (Екатеринбург, 2020), Международной конференции «Перспективные информационные технологии» (Самара, 2021), Международной конференции (технические и физико-математические науки) «Инновационное развитие: технический и технологический аспекты» (Ижевск, 2021), Всероссийской конференции «Научное исследование как основа инновационного развития общества» (Екатеринбург, 2021), Международной конференции по устойчивым материалам и технологиям (SMIT – 2021) (Кемерово, 2021), Международной конференции «Автоматизация» (RusAutoCon – 2021) (Сочи, 2021).

Публикации. По тематике диссертации опубликовано 29 научных работ, в том числе 8 работ в рецензируемых научных изданиях, определенных ВАК РФ и Аттестационным советом УрФУ, из них 4 статьи в журналах, индексируемых в базе Scopus; 1 свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ, 1 монография.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, 4 глав, заключения, списка литературы и 3 приложений; изложена на 195 страницах, содержит 54 рисунка, 4 таблицы, список цитируемой литературы из 174 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность выбранной темы диссертационного исследования, сформулирована цель работы, отражены научная новизна и прикладная значимость полученных результатов, приведены положения, выносимые автором на защиту.

В первой главе проведен обзор и анализ методов и средств обеспечения качества и сокращения потерь при производстве РФЛП, приведены данные по основным ТП, отвечающим за результативность производства РФЛП. Обоснован выбор подхода, позволяющего прогнозировать и определять технологические операции сбоя, осуществлять экономически выгодные действия по восстановлению ТП в случае сбоев или отказов.

Во второй главе описана разработка комплекса моделей ТП производства РФЛП. Предложена концептуальная модель ТП, которая выражена через основную понятийную базу, включающую такие понятия, как ТП, с помощью которого реализуется производство РФЛП; структура ТП, определяющая состав и порядок выполнения операций; состояния, характеризующие ход реализации ТП; поведенческие свойства, через которые определяется соответствие контролируемых параметров ТП выполняемым требованиям; сбои, приводящие к нештатным ситуациям, в частности к остановке ТП и восстановлению его нормального хода.

Разработана универсальная структурно-функциональная модель ТП производства РФЛП, учитывающая состав операций, их связь и переходы между ними, позволяющая строить на ее основе модели ТП с конкретными технологиями производства РФЛП.

На рисунке 1 представлена структурно-функциональная модель ТП в виде графа, в котором вершины ассоциированы с технологическими операциями, осуществляемыми в модельном времени в пошаговом режиме. Показаны возможные переходы при продвижении операций по цепочке технологического процесса и поведение модели в рамках вершинного перехода, что позволяет интерпретировать переходы по вершинам графа в виде переходов элементарного цифрового автомата, для которого определены сигналы на входах $X = \{X_1, X_2, X_3\}$, $x \in \{0, 1\}$ и сигналы на выходах $Y = \{Y_1, Y_2, Y_3\}$, $y \in \{0, 1\}$. Такой прием позволяет перейти к универсальному представлению ТП, использовать аппарат математической логики (алгебры событий) для формального описания критических ситуаций.

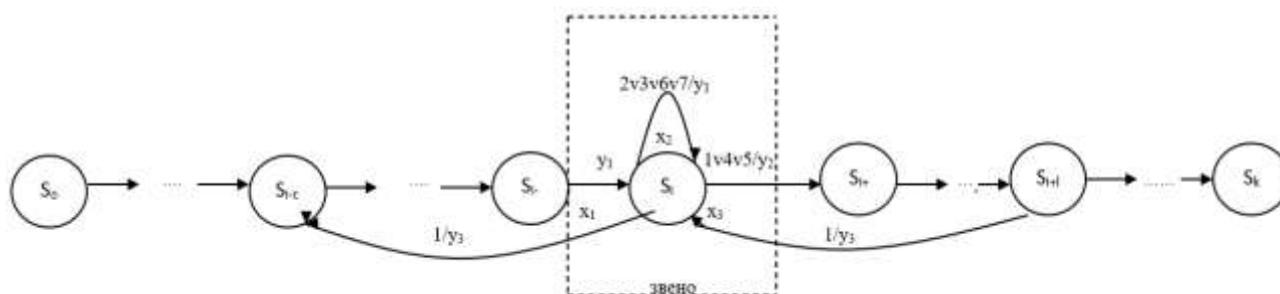


Рисунок 1 – Структурно-функциональная модель ТП

Рассмотренные описания переходов позволяют перейти к представлению ТП полной структурной таблицей переходов / выходов (таблица 1), которая интерпретирует возможности осуществления операций в рамках ТП.

Таблица 1 – Структурная таблица переходов / выходов

S(σ)	x(σ)							
	000	001	010	011	100	101	110	111
S _{i-1}					S _{i+1} /y ₂	S _{i+1} /y ₂		
S _i		S _{i+1} /y ₂	S _i /y ₁	S _i /y ₁	S _i /y ₂	S _{i+1} /y ₂	S _i /y ₁	S _i /y ₁
S _{i+1}		S _i /y ₃						

В третьей главе представлена разработка вероятностно-статистической модели ТП производства РФЛП.

Общий показатель качества выполнения операции P_{бр} определяется как произведение P_{бр} = P₁ P₂ P₃, где P₁ – вероятность безошибочной работы персонала, P₂ – вероятность безотказной работы оборудования и средств реализации операции, P₃ – вероятность использования качественных компонентов для производства РФЛП.

Вероятность P_j безошибочного выполнения операций j-го вида применительно к фазе устойчивой работы определяется на основе статистических данных: P_j = (N_j – C_{отj}) / N_jλ_j = C_{отj} / (N_jT_j), где N_j – общее число выполняемых операций j-го вида; C_{отj} – число ошибок, допущенных при выполнении операций j-го вида; λ_j – интенсивность этих ошибок; T_j – среднее время выполнения операции j-го вида.

Вероятность отказов используемого в ТП оборудования и средств во время выполнения операций определяется на основе статистических данных, полученных в процессе реального производства РФЛП при многократном проведении ТП.

Для оценки поведенческих свойств ТП в динамическом режиме построена его вероятностно-статистическая модель, в основу которой положена цепочка детерминированных состояний и переходов в автоматной структурно-функциональной модели, путем замены на переходах сигналов на их вероятности. В результате получен вероятностный граф, в котором функции переходов носят вероятностный характер и задают вероятности появления состояния в момент времени (t + 1) и вероятности появления выходного сигнала (рисунок 2).

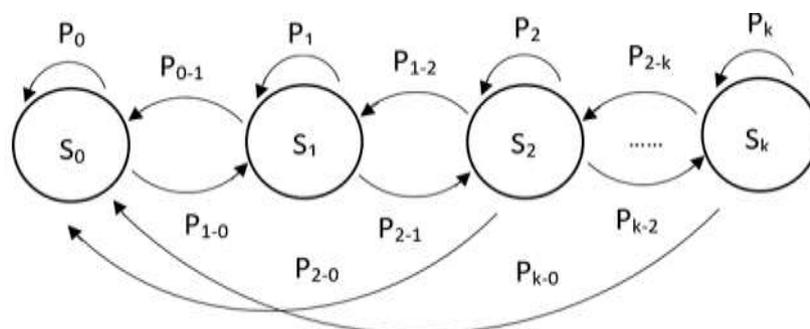


Рисунок 2 – Вероятностная модель ТП

Показано, что для описания поведения ТП наиболее подходит вероятностный автомат Мура: P [a(t + 1)·y(t) / a(t), x(t)] = P [a(t + 1) / a(t), x(t)] · P [y(t) / a(t)].

Такая модель позволяет контролировать параметры ТП на каждом шаге операций, управлять его ходом в случае сбоя (отказа) посредством изменения линейной структуры модели путем использования петель обратной связи или возвратов к начальным вершинам.

Построенная модель ТП дает возможность проводить имитационное моделирование с целью определения режимов функционирования ТП, позволяющих обеспечить требуемое качество производимого РФЛП в полном соответствии с технологией его изготовления, осуществлять на предварительном этапе прогноз сбоев и восстановления ТП, снижать временные и ресурсные затраты на производство РФЛП, а также использовать ее в реальном времени для оперативного контроля и вмешательства в ТП для принятия обоснованных решений.

Для построения распределения случайной величины значений вероятностей сбоев технологических операций использовался массив эмпирических данных, который был создан на основе статистического анализа запусков ТП.

На основе статистических апостериорных вероятностей данных, полученных в ходе изготовления большого количества партий РФЛП, разработана вероятностно-статистическая модель технологического процесса производства РФЛП как решение уравнения регрессии в виде полинома 6-й степени, которое описывает поведенческие свойства ТП с необходимой точностью и позволяет на ее основе построить систему имитационного моделирования ТП для анализа контроля и управления его параметров в штатных и нештатных режимах.

Получены результаты компьютерного анализа доверительного интервала для объема выборки основного параметра – операции ТП производства РФЛП. Для проведения исследований по обоснованию доверительного интервала выборки использована процедура, включающая следующие шаги:

- 1) задание доверительной вероятности u (надежности);
- 2) оценка по выборке параметра a ;
- 3) нахождение ошибки E из соотношения для a ;
- 4) расчет доверительного интервала ($a - E$; $a + E$).

Выполненный расчет доверительного интервала выборки статистических данных ТП, определил диапазон (0,0335; 0,0546), покрывающий среднеквадратичное отклонение (σ) с надежностью 95 %. Проведен расчёт регрессий для вероятностей сбоев ТП, результатом которого стало построенное агрегирующее распределение, максимально близкое к реальным показателям

Из статистических данных определено среднее значение вероятности сбоя на всех 44 технологических операциях ТП производства РФЛП ⁸⁾, равное 0,0628, и среднее квадратичное отклонение, равное 0,0441.

Стандартная ошибка выборки:

$$S_c = \frac{\sigma}{\sqrt{n}} = \frac{0,044}{\sqrt{39}} = 0,0071.$$

⁸⁾ Технологический процесс производства РФЛП состоит из 44 технологических операций, 39 из которых являются критическими с точки зрения влияния на конечный результат (получение РФЛП необходимого качества) и характеризуются показателями, имеющими числовое или булево значение.

С вероятностью 0,95 можно утверждать, что среднее значение при выборке большого объема не выйдет за пределы найденного интервала. Случайная ошибка дисперсии верхней границы: $t_B = 0,0030$.

Для проведения анализа поведенческих свойств ТП на операционном уровне предложено описание состояний рассматриваемого ТП на основе модели марковских цепей, позволяющей решать задачи управления событиями, в частности по снижению влияния случайных отрицательных факторов, вызывающих сбой в работе ТП.

Рассмотрены способы применения вероятностных распределений в модели ТП и показана эффективность экспоненциального распределения на примере использования пуассоновского закона для случая возникновения редких событий.

Проведен расчёт регрессий для вероятностей сбоев ТП, результатом которого стало построенное агрегирующее распределение, максимально близкое к реальным показателям.

Проведен анализ поведенческих свойств ТП на основе модели марковских цепей. Использование марковских цепей предполагает наличие матрицы переходных вероятностей, в которой каждая колонка позволяет определить вероятность наступления события сбоя в ходе выполнения ТП исходя из того, какое событие было предыдущим. На рисунке 3 приведен фрагмент графа вероятностно-статистической модели ТП.

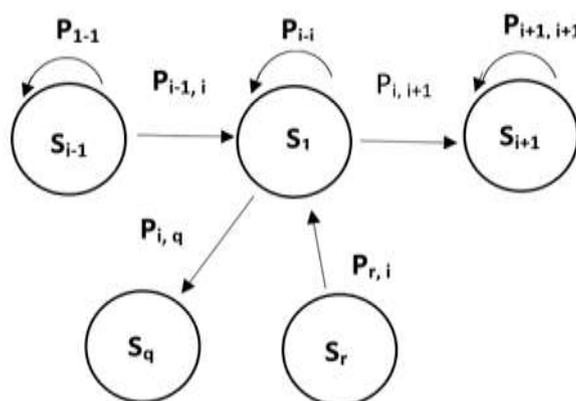


Рисунок 3 – Цепь Маркова рассматриваемого ТП

Использование марковской цепи позволяет описать все возможные переходы в ТП с помощью условных вероятностей и рассмотреть ситуации, связанные с возникновением рисков и необходимостью введения в графовую модель возвратных переходов. Переходы формально отображаются через вероятности перехода, например, для выделенного фрагмента модели ТП: $S_{i-1} \rightarrow S_i$ как $P(S_i) = P(S_{i,i}) \cdot P_{i-1,i} \cdot P_{r,i}$; вероятность перехода $S_i \rightarrow S_{i+1}$ как $P(S_{i+1}) = P(S_{i,i}) \cdot P(S_{i+1,i+1}) \cdot P_{i,i+1}$; вероятность перехода $S_r \rightarrow S_i$ как $P_{об(i)}$, где $P_{об(i)}$ – вероятность сбоя в i -й вершине. Структура переходов с использованием вероятностей приведена в таблице 2.

Таблица 2 – Структура переходов с использованием вероятностей

	S_{i-1}	S_i	S_{i+1}	S_j	S_q
S_{i-1}	$P_{i-1,i-1}$	$P_{i-1,i}$	-	-	-
S_i	-	$P_{i,i}$	$P_{i,i+1}$	-	$P_{i,q}$
S_{i+1}	-	-	-	-	-
S_r	-	$P_{r,i}$	-	-	-

Матрица переходов ТП представляет собой диагональную матрицу с диагональю правее главной. Запишем последовательные переходы, например, в цепи модели $S_0 \rightarrow S_1 \rightarrow S_3$ с вероятностями $P(S_0)$, $P(S_1)$, $P(S_3)$ в нотациях марковской цепи для модели, в которой действует вектор входных сигналов $X = (X_n)_{n \in \mathbb{N}} = (X_0, X_1, X_2)$, причем $X_n \in E$, $n \in \mathbb{N}$, тогда марковское свойство подразумевает, что в ТП есть нотация вида $P = P_{x_0 \rightarrow x_1} \cdots P_{x_{n-2} \rightarrow x_{n-1}} \cdots P_{x_{n-1} \rightarrow x_n}$.

Рассматривая возможности переходов от операции (вершин графа модели ТП) и исходя из семантики содержания хода ТП, включающего множество переходов между операциями, следует учитывать моменты времени, когда осуществляются переходы, и условия, при которых происходят эти переходы. Так как они осуществляются в определенные моменты и на выполнение самих операций требуется временной промежуток, то необходимо в вероятностях перехода (условных вероятностях) учитывать занятость вершины исполнением соответствующей ей операции. Следует также принимать во внимание присутствие на входе вершины запросов на выполнение ее операции повторно.

К таким переходам следует отнести:

- 1) переход на начало собственной операции ($S_i \rightarrow S_i$);
- 2) переход на выполнение этой же операции по запросу предыдущей операции ($S_{i-1} \rightarrow S_i$);
- 3) переход по запросу от сбойной вершины ($S_r \rightarrow S_i$).

Следовательно, условные вероятности должны быть учтены в матрице переходов с помощью достаточно простых записей. Таблица условных переходов будет выглядеть следующим образом (таблица 3):

Таблица 3 – Таблица условных переходов

Направление	Условие
$S_i \rightarrow S_i$	$S_i = 0$
$S_{i-1} \rightarrow S_i$	$S_i = 0$
$S_r \rightarrow S_i$	$S_i = 0$

Условные вероятности переходов в каждом звене можно записать как:

$P(S_{i-1} \rightarrow S_i) = P(S_i / \bar{S}_i S_{i-1})$, т.е. вершина S_i свободна, операция в ней завершена в предыдущий момент времени, а вершина S_{i-1} освободилась от операции ($i-1$);

$P(S_i \rightarrow S_i) = P(\bar{S}_i / S_i)$, т.е. вершина S_i свободна для выполнения операции запроса от вершины S_{i-1} ;

$P(S_i \rightarrow S_{i+1}) = P(S_{i+1} / \bar{S}_i S_{i+1})$, т.е. операция в вершине S_i закончилась успешно, а вершина S_{i+1} свободна;

$P(S_r \rightarrow S_i) = P(\bar{S}_i / S_r)$, т.е. в вершине S_r произошел сбой, а вершина S_i свободна;

$P(S_i \rightarrow S_q) = P(S_q / S_q S_i)$, т.е. вершина S_q свободна, а в вершине S_i операция завершена успешно.

Сформированные другими вершинами запросы в случае занятости перехода должны находиться в состоянии ожидания, и при имитационном моделировании это событие должно имитироваться задержкой на время, отводимое на выполнение текущей операции.

В четвертой главе выполнена разработка онтологических средств поддержки имитационного моделирования технологического процесса. Определены этапы процесса построения онтологии предметной области ТП производства РФЛП, включающие:

- подготовительный этап (формирование базы документов, образующих предметную область и необходимых для дальнейшего анализа и составления глоссария терминов);
- этап синтаксического и семантического анализа технологической документации;
- этап фильтрации глоссария терминов предметной области (поиск и исключение терминов);
- этап создания онтологии предметной области (при построении онтологии использованы библиотеки и пакеты для обработки текста `nltk`, `rake_nltk`).

Таким образом, создана онтология ТП производства РФЛП для проведения моделирования, которая описывает стадии производства, контролируемые параметры и их проверочные значения (рисунок 4).

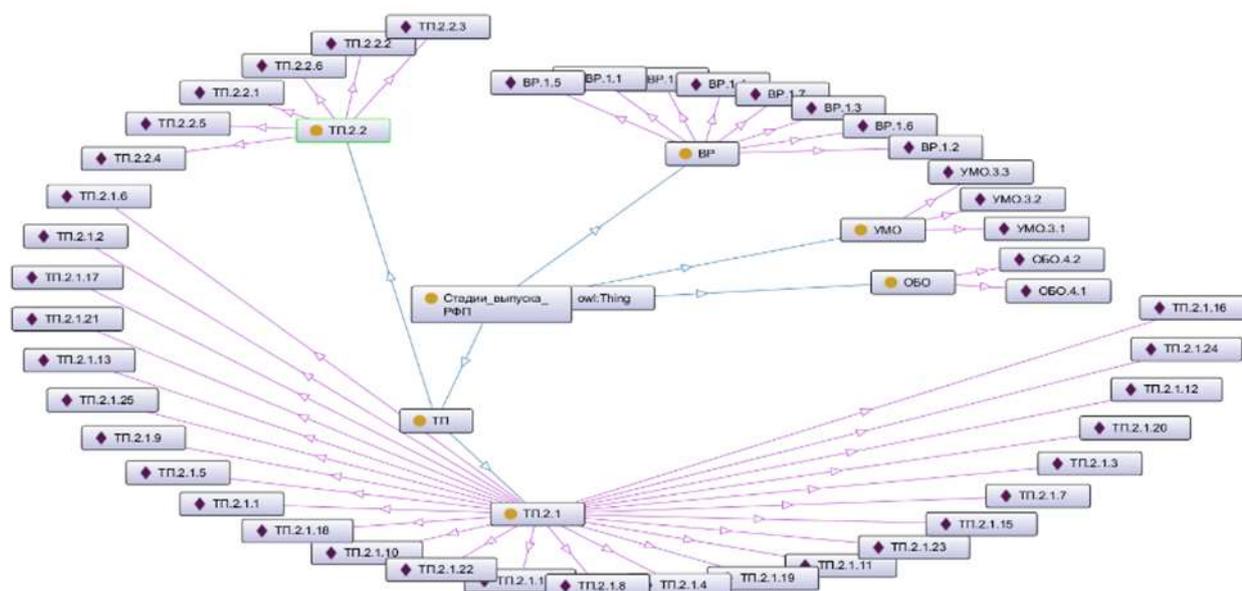


Рисунок 4 – Дерево онтологии процесса производства РФЛП

Создан имитатор для проведения имитационного моделирования ТП (рисунок 5), который выполняет следующие функции:

- ввод оператором и проверка на корректность текущих показателей выполнения операций ТП;
- подключение к базам онтологии и обмен данными (на языке SPARQL);
- подключение к базе данных прецедентов и обмен данными с ней (на языке SQL);
- формирование проверочных матриц на основе классов, объектов и их атрибутов, представленных в онтологии;
- проверка введенных оператором показателей и запись результатов в базу прецедентов.

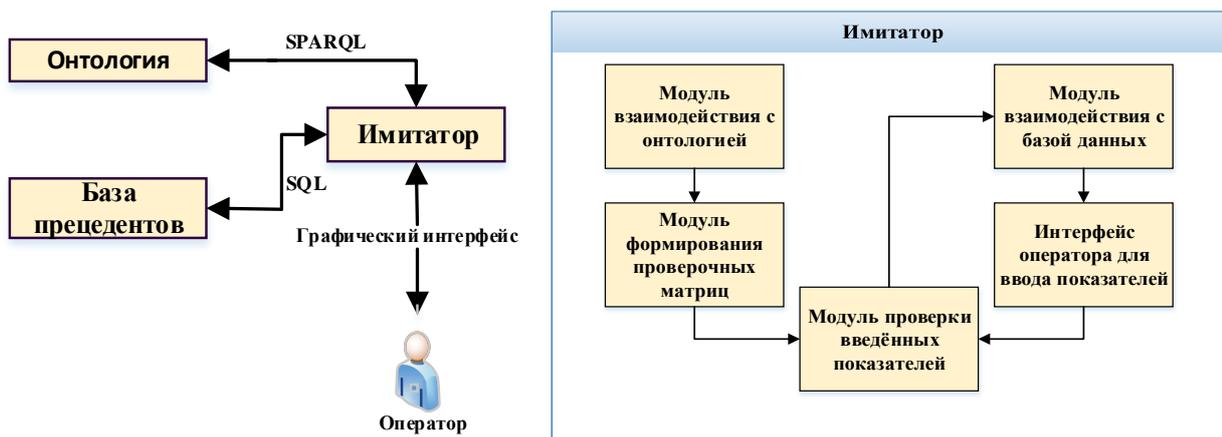


Рисунок 5 – Имитатор для проведения имитационного моделирования ТП РФЛП: схема работы (слева); модульная схема (справа)

На рисунке 6 представлен алгоритм работы имитатора, включающий в себя следующие шаги: подключение к онтологии и базе данных прецедентов; формирование проверочных матриц на основе данных из онтологии; ввод показателей с помощью интерфейса;

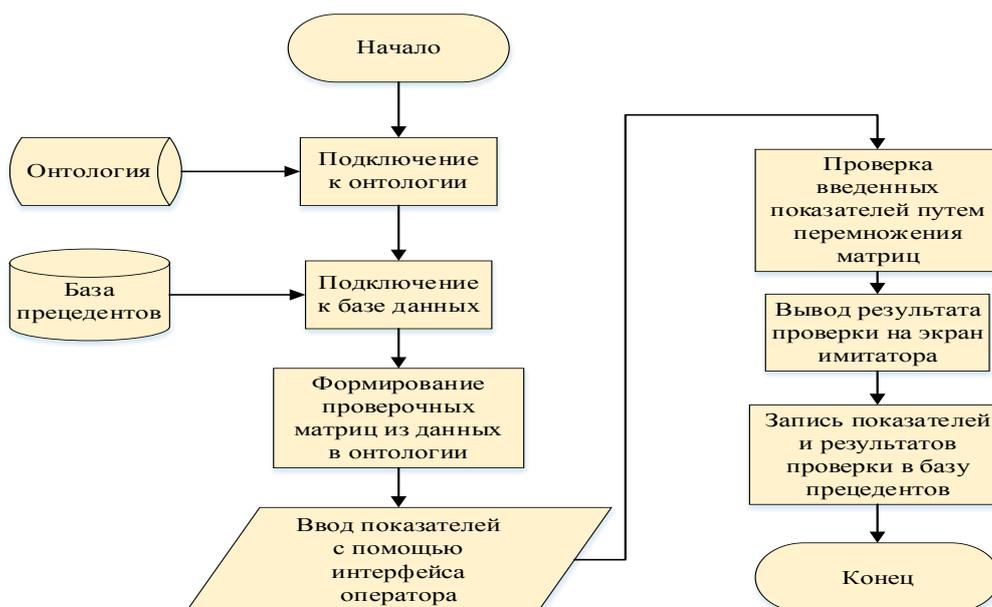


Рисунок 6 – Алгоритм работы имитатора

Сформирована база прецедентов, содержащая пять таблиц: операторы и контроллеры производства, полный список операций производства РФЛП с привязкой по стадиям, истории выпусков РФЛП, вводимые ранее показатели по операциям производства РФЛП, выпуски РФЛП с описанием результата проверки и датой проверки. Для проверки выполнения каждой стадии ТП созданы матрицы проверки выполнения стадий производства РФЛП, обеспечивающие автоматизацию работы системы контроля вводимых данных при выполнении ТП.

Имитатор представляет собой web-приложение, структура которого представлена на рисунке 7.

В четвертой главе подробно описан разработанный программный комплекс «Имитатор технологического процесса производства радиофармацевтических лекарственных препаратов», предназначенный для решения основных задач диссертационной работы. Программный комплекс зарегистрирован в ФИПС (свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2022615656).

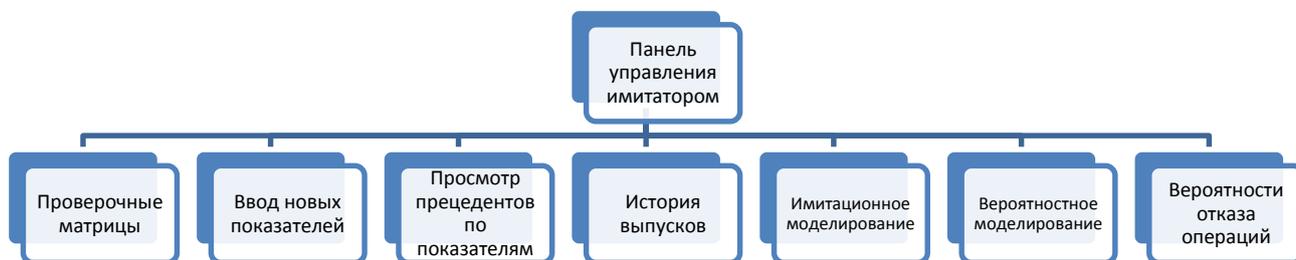


Рисунок 7 – Структурная схема web-приложения

В имитаторе реализуется агрегирующее вероятностное распределение, позволяющее анализировать отдельные составные этапы производства РФЛП, штатные и нештатные режимы, оценивать возможные риски сбоев путем искусственного введения аддитивной вероятностной добавки в начальное распределение рисков и при соответствующей адаптации применять имитатор в производственных условиях как систему оперативного контроля и управления.

На рисунке 8 представлены графики моделирования ТП с использованием распределения Пуассона (голубой цвет), нормального распределения (синий цвет), линейной регрессии (фиолетовый цвет). Для распределения Пуассона коэффициентом является λ (математическое ожидание случайной величины): $p(x) = \frac{\lambda^x}{x!} \cdot e^{-\lambda}$, где x – номер операции. Рассмотрены вероятностные оценки рисков при проведении ТП производства РФЛП, включая источники и факторы технического риска.

В ходе функционирования имитатора были внесены данные еще по 70 пускам ТП. Система имеет возможность сравнения регрессий по прошлым пускам с регрессиями, получаемыми после каждого нового пуска (рисунок 9). Это позволяет отследить изменения в статистических данных, получаемых на реальном оборудовании, а также скорректировать математические зависимости с учётом новых значений, хранящихся в базе данных прецедентов.

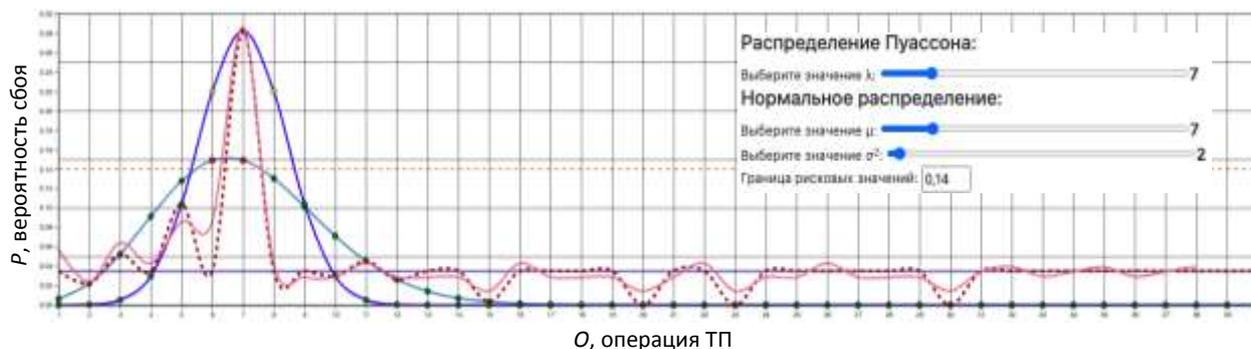


Рисунок 8 – Моделирование ТП производства РФЛП

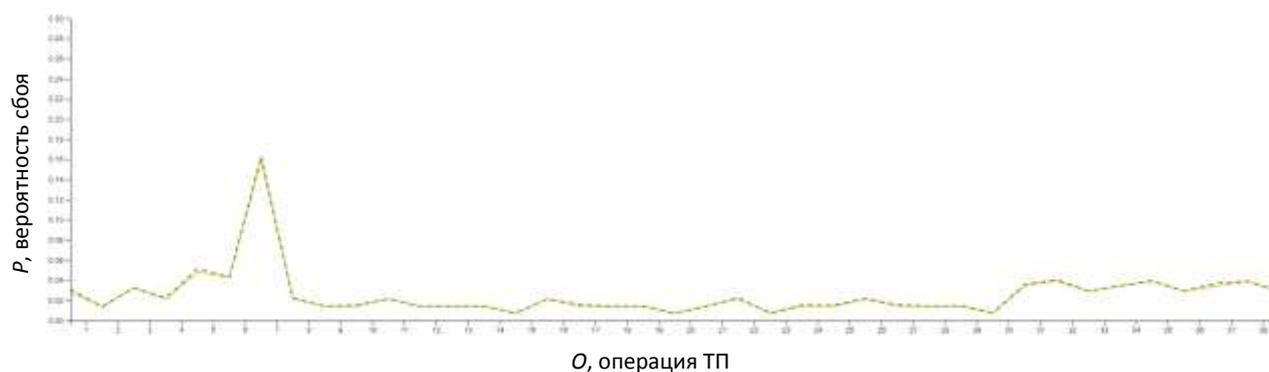


Рисунок 9 – График сравнения регрессии, полученной при первых 70 пусках (сплошная линия), с регрессией, полученной на 140 пусках (пунктирная линия)

Минимальное изменение вероятностей сбоев на каждой операции показывает, что полученная математическая зависимость достаточно точно описывает рассматриваемый ТП.

В заключении подведены итоги диссертационного исследования, изложены его основные выводы и обобщающие результаты, представлены перспективы дальнейшего развития темы диссертационной работы.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

При выполнении диссертационной работы разработаны теоретические основы для исследования и управления ТП производства РФЛП с использованием вероятностно-статистического моделирования режимов анализа появления сбойных ситуаций, причин и локализации мест сбоя и создания средств быстрых восстановительных работ, в частности получены следующие результаты:

- разработан подход к моделированию ТП производства РФЛП в ситуациях, близких к производственным условиям, на основе введения аддитивной вероятностной составляющей в начальное вероятностное распределение рисков технологических операций для выявления мест операций, имеющих наибольшие вероятности сбоя или отказа;

- разработана структурно-функциональная модель ТП, определяющая состав, структуру, функциональность ТП, позволяющая создавать средства подробного описания составных компонентов и их связей и строить на ее основе универсальное представление структур ТП при введении нового содержания технологий производства РФЛП;

- разработана вероятностно-статистическая модель поведенческих свойств ТП как вероятностного автомата, которая включает в себя множество состояний, интерпретирующих технологические операции, множество входов и выходов на каждом шаге исполнения процесса, множество переходов по производственной цепочке операций, вероятностное распределение рисков по каждой операции, что дает возможность корректного описания ТП и проведения имитационного моделирования;

- разработана онтология производства РФЛП, которая позволила создать онтологические средства поддержки имитационного моделирования и управления производством РФЛП, включающие в себя модели ТП и базу прецедентов ТП, описание возможных ситуаций сбоя и отказов оборудования, причин их возникновения, особенностей среды производственного процесса, основных технологических требований к качеству РФЛП и препаратов, из которых они изготавливаются, и профессиональных требований к исполнительскому персоналу;

- разработаны программные процедуры матричной обработки множества контрольных показателей функционирования ТП для уменьшения времени производства РФЛП, что имеет важное значение для выполнения требования изготовления «точно вовремя»;

- разработан комплекс программных средств – имитатор для моделирования режимов работы ТП, анализа и обработки контролируемых параметров, рисков, для выявления наиболее уязвимых состояний ТП, оценки качества РФЛП, процедур восстановления ТП в случае сбоев.

Полученная совокупность результатов диссертационной работы составляет теоретическую основу нового метода моделирования ТП производства РФЛП, пригодного для управления им с целью обеспечения заданных параметров качества производимой продукции и минимизации временных и ресурсных производственных потерь.

Практическая значимость результатов работы заключается в использовании полученных новых теоретических и прикладных научных результатов, качестве методов

и средств управления и автоматизации ТП производства РФЛП для достижения высокого качества лекарственной продукции и минимизации временных и ресурсных производственных потерь. Полученные с помощью разработанных моделей модели поведения производства и управления им результаты могут быть использованы как исходные данные для:

- оценки поведения состояний ТП в реальных условиях производства;
- проведения имитационного моделирования для определения показателей качества продукции при работе производства в штатных и нештатных ситуациях, а также оптимизации временных и материальных потерь при сохранении требуемого качества производимых РФЛП в пределах используемой технологии;
- варьирования параметрами процессов моделирования ТП на предварительном этапе подготовки производства с целью выявления уязвимых мест ТП или принятия оперативных мер в ходе выполнения реального ТП;
- использования разработанных онтологических средств обеспечения подготовки и проведения моделирования производственных событий и возможностей принятия обоснованных управленческих решений в ходе реструктурирования последовательности состояний ТП в случае возникновения сбойных ситуаций;
- анализа, управления ТП в режиме реального времени и создания баз прецедентов производственных событий.

Таким образом, поставленная в диссертационной работе цель достигнута, задачи решены в полном объеме.

Научные и прикладные результаты диссертационной работы внедрены на производстве радиофармацевтических предшественников в АО «ГНЦ НИИАР», г. Дмитровград (Акт о внедрении № 21-02/11 от 10.05.2023 г.) и на производстве радиофарм-препаратов в ООО «Медицина и ядерные технологии», г. Москва (Акт о внедрении б/н от 14.07.2023 г.).

Перспективы дальнейшей разработки темы исследования. Дальнейшая проработка темы исследования может касаться применения методов искусственного интеллекта для поиска оптимальных путей организации, автоматизации и управления высокотехнологичными производствами, в том числе за пределами производства РФЛП.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ АВТОРОМ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи, опубликованные в рецензируемых научных журналах и изданиях, определенных ВАК РФ и Аттестационным советом УрФУ:

1. Бильданов, Р. Г. Структурно-функциональное представление платформы онтологического моделирования процесса технологической подготовки производства / С. Н. Ларин, Р. Г. Бильданов, Рафик Г. Бильданов [и др.] // Автоматизация в промышленности. – 2023. – № 5. – С. 44-48. 0,3 п.л. / 0,1 п.л.

2. Бильданов, Р. Г. Практическая реализация алгоритмов планирования / Р. Г. Бильданов, Рафик Г. Бильданов, С. Н. Ларин // Технология машиностроения. – 2023. – № 1. – С. 47-57. 0,6 п.л. / 0,2 п.л.

3. Bildanov, R. G. Ontological tools for modeling the quality of radiopharmaceuticals production / S. N. Larin, R. G. Bildanov, A. A. Smagin // Lecture Notes in Electrical Engineering. – 2022. – Vol. 857 LNEE. – P. 214-223. 0,5 п.л. / 0,2 п.л. (Scopus)

4. Бильданов, Р. Г. Параметрическая модель технологического процесса производства радиофармацевтических лекарственных препаратов / Р. Г. Бильданов // Атомная энергия. – 2021. – Т. 131, № 2. – С. 93-96. 0,4 п.л. / 0,4 п.л.; Bildanov, R. G. Parametric model of the production process of radiopharmaceuticals / R. G. Bildanov // Atomic Energy. – 2021. – Vol. 131, No. 2. – P. 93-96. 0,4 п.л. / 0,4 п.л. (Scopus)

5. Бильданов, Р. Г. Оценка экономических потерь при неблагоприятных сценариях выполнения технологического процесса производства радиофармацевтических лекарственных препаратов / Р. Г. Бильданов, Рафик Г. Бильданов, С. Н. Ларин // Известия Самарского научного центра РАН. – 2021. – Т. 23, № 6(104). – С. 72-77. 0,5 п.л. / 0,2 п.л.

6. Бильданов, Р. Г. Параметры накопления ^{177}Lu в условиях различных ядерных реакторов / М. Ю. Тихончев, В. В. Светухин, С. Г. Новиков [и др.] // Атомная энергия. – 2018. – Т. 125, № 6. – С. 331-337. 0,5 п.л. / 0,1 п.л.; Bildanov, R. G. ^{177}Lu accumulation parameters in different nuclear reactors / M. Y. Tikhonchev, V. V. Svetukhin, S. G. Novikov [et al.] // Atomic Energy. – 2019. – Vol. 125, No. 6. – P. 376-383. 0,5 п.л. / 0,1 п.л.

7. Bildanov, R. G. Principal directions of developing the design methods for intelligent systems to control robots / V. V. Kozhevnikov, V. V. Prikhodko, V. V. Svetukhin [et al.] // Journal of Numerical Analysis, Industrial and Applied Mathematics. – 2018. – Vol. 12, No. 1-2. – P. 1-21. 1,2 п.л. / 0,07 п.л. (Scopus)

8. Бильданов, Р. Г. Определение физико-химических форм изотопов йода в вентиляционной системе реакторной установки ИВВ-2М / А. А. Екидин, М. Е. Васянович, Д. В. Марков [и др.] // Атомная энергия. – 2016. – Т. 121, № 4. – С. 237-239. 0,2 п.л. / 0,03 п.л.;

Bildanov, R. G. Determination of the Physicochemical Forms of Iodine Isotopes in the IVV-2M Reactor Ventilation System / A. A. Ekidin, M. E. Vasyanovich, D. V. Markov [et al.] // Atomic Energy. – 2017. – Vol. 121, No. 4. – P. 308-311. 0,2 п.л. / 0,03 п.л. (Scopus)

Патенты и программы:

9. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2022615656 Российская Федерация. Программное обеспечение для имитационного моделирования технологического процесса производства радиофармацевтических лекарственных препаратов : № 2022613325 : заявл. 03.03.2022 : опубл. 01.04.2022 / Р. Г. Бильданов.

Монографии:

10. Средства имитационного моделирования процессов производства радиофармацевтических препаратов / Р. Г. Бильданов, С. Н. Ларин, Рафик Г. Бильданов. – Ульяновск : УлГУ, 2022. – 184 с. 10,7 п.л. / 3,6 п.л.

В других изданиях:

11. Бильданов, Р. Г. Разработка системы моделирования, контроля и управления технологическим процессом производства радиофармацевтических лекарственных препаратов. Часть 1. Вероятностная модель технологического процесса / А. А. Смагин, А. А. Булаев, Р. Г. Бильданов [и др.] // Автоматизация процессов управления. – 2022. – № 1(67). – С. 21-32. 1,2 п.л. / 0,4 п.л.

12. Бильданов, Р. Г. Разработка имитатора для проведения моделирования, контроля и управления технологическим процессом производства радиофармацевтических лекарственных препаратов / А. А. Смагин, А. А. Булаев, Р. Г. Бильданов [и др.] // Автоматизация процессов управления. – 2022. – № 2(68). – С. 15-28. 1,0 п.л. / 0,25 п.л.

13. Бильданов, Р. Г. Алгоритмические основы производственных процессов контроля гальванических покрытий / Р. Г. Бильданов, Рафик Г. Бильданов, С. И. Кадямов // Новые научные исследования : сборник статей IX Международной научно-практической конференции, Пенза, 23 ноября 2022 года. – Пенза: Наука и Просвещение (ИП Гуляев Г.Ю.), 2022. – С. 75-85. 0,6 п.л. / 0,2 п.л.

14. Бильданов, Р. Г. Модель технологического процесса изготовления радиофармацевтических лекарственных препаратов / А. А. Смагин, А. А. Булаев, Р. Г. Бильданов [и др.] // Перспективные информационные технологии (ПИТ 2022) : труды Международной научно-технической конференции, Самара, 18–21 апреля 2022 года / под ред. С. А. Прохорова. – Самара: Издательство Самарского научного центра РАН, 2022. – С. 287-292. 0,3 п.л. / 0,07 п.л.

15. Бильданов, Р. Г. Трехкомпонентная модель организации планирования электрохимического производства / Р. Г. Бильданов, Рафик Г. Бильданов, С. Н. Ларин // Символ науки: международный научный журнал. – 2022. – № 2-2. – С. 13-16. 0,25 п.л. / 0,1 п.л.

16. Бильданов, Р. Г. Проектирование средства проверки выполнения этапов производства радиофармпрепаратов / А. А. Смагин, С. Н. Ларин, Р. Г. Бильданов [и др.] // Перспективные информационные технологии (ПИТ 2021) : Труды Международной научно-технической конференции, Самара, 24–27 мая 2021 года / под ред. С.А. Прохорова. – Самара: Самарский научный центр РАН, 2021. – С. 113-117. 0,2 п.л. / 0,05 п.л.

17. Бильданов, Р. Г. Построение системы проверки выполнения этапов производства радиофармпрепаратов / Р. Г. Бильданов, Р. Г. Бильданов // Научные исследования как основа инновационного развития общества : Сборник статей по итогам Всероссийской научно-практической конференции, Екатеринбург, 06 июня 2021 года. – Стерлитамак: Общество с ограниченной ответственностью «Агентство международных исследований», 2021. – С. 13-19. 0,2 п.л. / 0,1 п.л.

18. Бильданов, Р. Г. Методология проверки выполнения этапов производства радиофармпрепаратов / Р. Г. Бильданов, Рафик Г. Бильданов // Инновационное развитие: технический и технологический аспекты : сборник статей по итогам Международной научно-практической конференции, Ижевск, 09 июня 2021 года. – Стерлитамак : ООО «Агентство международных исследований», 2021. – С. 9-15. 0,3 п.л. / 0,15 п.л.

19. Bildanov, R. G. What is it necessary to change in the system of standards' management / N. K. Kazantseva, T. V. Kazantseva, R. G. Bildanov [et al.] // Стандарты и качество. – 2020. – № 6. – С. 23. 0,05 п.л. / 0,01 п.л.

20. Бильданов, Р. Г. Применение системного подхода к внедрению и развитию систем менеджмента в организации / Р. Г. Бильданов, Л. В. Байбакова // Роль технического регулирования и стандартизации в эпоху цифровой экономики : Сборник статей II Международной научно-практической конференции молодых ученых, Екатеринбург, 21 апреля 2020 года. – Екатеринбург: Издательский дом «Ажур», 2020. – С. 38-43. 0,3 п.л. / 0,15 п.л.

21. Бильданов, Р. Г. Проблемы управления качеством продукции. СМК как объект науки / В. Н. Горлов, Р. Г. Бильданов, Л. В. Байбакова // Вестник качества. – 2020. – № 5. – С. 3-12. 0,6 п.л. / 0,2 п.л.

22. Бильданов, Р. Г. Опыт формирования системы управления знаниями в акционерном обществе «Институт реакторных материалов» / С. Н. Фокина, О. А. Сиденко, К. И. Ильин [и др.] // Интеллектуальная собственность и инновации : материалы X международной научно-практической конференции, Екатеринбург, 26 апреля 2018 года / Министерство образования и науки Российской Федерации, ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина»; Ред. коллегия: Шульгин Д. Б., Метелев Д. А., Баглаева Е. М. – Екатеринбург: Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина, 2018. – С. 239-251. 0,8 п.л. / 0,2 п.л.

23. Bildanov, R. G. The selection criteria elements of X-ray optics system / I. V. Plotnikova, N. V. Chicherina, S. S. Bays [et al.] // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering : 6th International Conference: Modern Technologies for Non-Destructive Testing, Tomsk, 09–14 октября 2017 года. Vol. 289. – Tomsk: Institute of Physics Publishing, 2018. – P. 012029. 0,04 п.л. / 0,01 п.л.

24. Бильданов, Р. Г. Опыт АО «ИРМ»: бережливое производство радиоизотопной продукции / Р. Г. Бильданов, Н. Г. Мехонцева, И. В. Олексин [и др.] // Методы менеджмента качества. – 2018. – № 3. – С. 40-43. 0,2 п.л. / 0,1 п.л.

25. Bildanov, R. G. Preparing a corporate system of standards to digitization / N. K. Kazantseva, R. G. Bildanov, V. A. Aleksandrov [et al.] // International Journal of Civil Engineering and Technology. – 2018. – Vol. 9, No. 6. – P. 1567-1573. 0,4 п.л. / 0,1 п.л.

26. Bildanov, R. G. Variants of the digitization for a specific technological process / N. K. Kazantseva, T. V. Kazantseva, R. G. Bildanov [et al.] // International Journal of Mechanical Engineering and Technology. – 2018. – Vol. 9, No. 10. – P. 1186-1192. 0,35 п.л. / 0,1 п.л.

27. Бильданов, Р. Г. Система менеджмента качества АО «Институт реакторных материалов». Опыт разработки и внедрения / Е. С. Родченкова, Н. Г. Мехонцева, Р. Г. Бильданов [и др.] // Техническое регулирование в едином экономическом пространстве : сборник статей V Всероссийской научно-практической конференции с международным участием. 22 мая 2018 г., Екатеринбург. – Екатеринбург : РГППУ, 2018. – С. 82-91. 0,4 п.л. / 0,1 п.л.

28. Бильданов, Р. Г. Инновационное развитие организации - как основная цель реализации системы управления знаниями в АО «ИРМ» / Р. Г. Бильданов, О. А. Сиденко, С. В. Татарина // Интеллектуальная собственность и инновации : материалы IX международной научно-практической конференции, Екатеринбург, 26 апреля 2017 года / Министерство образования и науки Российской Федерации, ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина»; Ред. коллегия: Шульгин Д. Б., Метелев Д. А., Баглаева Е. М. – Екатеринбург: Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, 2017. – С. 16-27. 0,7 п.л. / 0,2 п.л.

29. Бильданов, Р. Г. Влияние СМК на развитие организации. Модульная программа обучения руководителей среднего звена / Д. В. Марков, Р. Г. Бильданов, Л. Ю. Ермолаева [и др.] // Методы менеджмента качества. – 2014. – № 3. – С. 24-28. 0,2 п.л. / 0,1 п.л.

Научное издание

Бильданов Радий Газембякович

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

«Средства имитационного моделирования для автоматизации
и управления технологическими процессами производства
радиофармацевтических лекарственных препаратов»

2.3.3. Автоматизация и управление технологическими процессами
и производствами