

На правах рукописи

ЯКИМОВ
Анатолий Иванович

**ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ТЕХНОЛОГИИ
ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ И ПРИНЯТИЯ
РЕШЕНИЙ В ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМАХ
ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ**

Специальность 05.13.10 – Управление в социальных
и экономических системах

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

Брянск – 2017

Работа выполнена в Государственном учреждении высшего профессионального образования «Белорусско-Российский университет».

Научный консультант **Аверченков Владимир Иванович**, Заслуженный деятель науки РФ, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Компьютерные технологии и системы» ФГБОУ ВО «Брянский государственный технический университет».

Официальные оппоненты: **Борисов Вадим Владимирович**, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Вычислительная техника» Филиала ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ» в г. Смоленске;

Мазин Анатолий Викторович, доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Информационная безопасность автоматизированных систем» Калужского филиала МГТУ им. Н.Э. Баумана;

Савина Ольга Александровна, доктор экономических наук, профессор, профессор кафедры «Информационные системы» ФГБОУ ВО «ОГУ имени И.С. Тургенева».

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова Российской академии наук

Защита состоится 16 января 2018 г. в 14.00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.021.03 на базе ФГБОУ ВО «Брянский государственный технический университет» по адресу: 241035, г. Брянск, ул. Харьковская, д.10-Б, учебный корп. № 4, ауд. Б101.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Брянский государственный технический университет» и по адресу в сети интернет: <http://www.tu-bryansk.ru/content/nauka/zacsh>.

Отзывы на автореферат высылать по адресу: 241035, г. Брянск, бульвар 50 лет Октября, 7, ФГБОУ ВО «Брянский государственный технический университет».

Автореферат разослан «__» _____ 2017 г.

Ученый секретарь диссертационного совета
кандидат технических наук, доцент

М.Ю. Рытов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Внутрифирменное управление промышленным предприятием является одним из важнейших объектов исследования в теории управления социально-экономическими системами (СЭС). Повышение эффективности управления в СЭС достигается, в частности, использованием информационных систем, построенных на современных компьютерных технологиях. Корпоративная информационная система (КИС) промышленного предприятия, являясь средой информационной поддержки целенаправленной коллективной деятельности сотрудников предприятия, решает задачу эффективного управления материально-техническими, финансовыми, технологическими, трудовыми и интеллектуальными ресурсами предприятия для достижения заданных показателей производственно-экономической деятельности. Она включает в себя различные программно-аппаратные платформы, универсальные и предметно-ориентированные программные приложения, интегрированные в единую информационно-однородную систему.

Оптимизация процессов функционирования производственной фирмы (предприятия) осуществляется путем декомпозиции из этих процессов отдельных компонентов и связанных с ними функций структурных подразделений, позволяющих выполнить формальное описание и построить модели оптимизации, именуемые оптимизационными моделями внутрифирменного управления. Задачи математического моделирования и оптимизации процессов деятельности предприятий в условиях структурных и параметрических изменений производственной и внешней среды, дальнейшего совершенствования методов имитационного моделирования процессов функционирования промышленного предприятия для их системного представления с учетом принятия решений представляются весьма актуальными при внедрении корпоративных информационных систем и дальнейшем развитии информационных технологий.

Степень разработанности темы. Разработке теоретических основ управления производственными организациями, как активными социально-экономическими системами, посвящены работы многих российских и зарубежных ученых. Значительный вклад внесли А. А. Ашимов, В. Н. Бурков, В. Н. Волкова, В. Л. Волкович, И. А. Горгидзе, М. В. Губко, А. А. Емельянов, Дж. Клир, О. И. Ларичев, Д. Мако, М. Месарович, В. С. Михалевич, С. П. Мишин, Д. А. Новиков, Ф. И. Перегудов, Г. Саймон, И. М. Смирнов, И. Такахара, Ф. П. Тарасенко, Н. П. Федоренко, Дж. Форрестер, Т. Е. Шохина, В. З. Ямпольский и др.

Разработке методов и моделей внутрифирменного управления на основе применения современных информационных технологий уделено достаточно внимания многими учеными. Большой вклад в разработку этих проблем внесли Р. Л. Акофф, В. Г. Алиев, М. Ю. Афанасьев, И. В. Афонин, М. И. Баканов, В. И. Воропаев, Д. И. Галенко, Е. С. Гламаздин, С. Д. Ильенкова, В. В. Ковалев, Д. А. Новиков, У. У. Оливер, Г. Ортнер, Э. А. Уткин, А. В. Цветков и др.

Проблеме исследования оптимизационных моделей внутрифирменного управления на основе имитационного моделирования, задачам оптимального планирования и распределения ресурсов промышленного предприятия посвящены работы П. В. Авдулова, И. В. Бурковой, А. Г. Гранберга, А. Ю. Заложнева, В. С. Июзайтиса, А. А. Кугаенко, И. В. Максимея, А. А. Спирина, В. И. Терехина, Л. Л. Терехова, Я. М. Уринсона и др.

Однако, несмотря на большое число опубликованных работ, в указанной области все еще остаются нерешенные проблемы, касающиеся вопросов совершенствования механизмов принятия решений по повышению эффективности управления промышленными предприятиями на базе применения современных информационных технологий, прежде всего, вопросов системного имитационного моделирования процессов функционирования производственной фирмы.

Объектом диссертационного исследования является система управления промышленного предприятия с корпоративной информационной системой.

Предметом исследования являются оптимизационные модели распределения финансовых, материальных и трудовых ресурсов промышленного предприятия на основе имитационного моделирования с применением комплекса информационных технологий.

Целью диссертационной работы является разработка теоретических положений и новых подходов к технологии имитационного моделирования и принятию решений в информационных системах управления промышленного предприятия.

Для достижения поставленной цели исследования в диссертации были поставлены и решены следующие основные задачи:

1. Разработать метод поиска рациональных параметров процессов управления производственно-экономической деятельностью предприятия на основе имитационного моделирования (ИМ) с комплексным применением современных информационных технологий.

2. Предложить базовую имитационную модель типовых процессов управления для системного анализа производственно-экономической деятель-

ности промышленного предприятия и технологию использования этой имитационной модели, обеспечивающую реализацию вышеуказанного метода.

3. Разработать метод решения многокритериальной задачи построения оптимизационных моделей системы управления промышленного предприятия с применением базовой имитационной модели в КИС.

4. Разработать программные средства для автоматизации метода поиска параметров рациональных процессов управления производственно-экономической деятельностью предприятия.

5. Создать специальный программно-технологический комплекс имитации сложных систем (ПТКИ), интегрированный в корпоративную информационную систему предприятия и позволяющий разрабатывать оптимизационные модели самими специалистами предприятия.

6. Предложить новые технологии использования программно-технологического комплекса для реализации методов построения имитационных моделей и поиска рациональных решений при управлении производственно-экономической деятельностью промышленного предприятия.

7. Провести апробацию разработанных методов, средств и технологий в ходе внедрения программно-технологических комплексов на промышленных предприятиях Республики Беларусь и Российской Федерации.

Научная новизна состоит в том, что впервые разработаны:

1. Теоретические положения технологии имитационного моделирования и принятия решений в информационных системах управления промышленного предприятия, основанные на представлении информационной системы в виде многоуровневой иерархической социально-экономической системы и введении понятия ресурсов f - и p -типа, решении многокритериальной оптимизационной задачи управления проектированием имитационных моделей внутрифирменного управления предприятием.

2. Метод построения имитационной модели функционирования промышленного предприятия, основанный на процессном способе моделирования, включающий новые подходы на основе информационных технологий КИС и координирующих элементов в технологии использования ИМ в структуре системы управления.

3. Метод многокритериального управления построением имитационных моделей процессов функционирования промышленного предприятия с использованием комплекса информационных технологий КИС путем применения ресурсов f - и p -типа, основанный на использовании принципа оптимальности Беллмана.

4. Метод поиска рациональных параметров процессов управления, основанный на имитации системы управления ресурсами производственной фирмы с помощью базовой имитационной модели, отличающийся использованием стохастических алгоритмов оптимизации и постулата совместимости координирующих решений.

5. Алгоритм количественной оценки координирующих действий в системе управления при решении многокритериальных задач на основе базовой имитационной модели функционирования предприятия с применением аксиоматического принципа Парето и постулата совместимости.

Теоретическая значимость работы состоит в разработке новых теоретических положений технологии имитационного моделирования и принятия решений в информационных системах управления промышленными предприятиями, основанных на представлении информационной системы в виде многоуровневой иерархической социально-экономической системы и введении понятий ресурсов f - и p -типа, решении многокритериальной оптимизационной задачи управления проектированием имитационных моделей внутрифирменного управления предприятием. Разработанные теоретические положения отличаются новым подходом к применению информационных технологий корпоративной информационной системы, использованием ее имитационного моделирования, как концептуального развития общего метода моделирования сложных систем на основе комплексного применения современных информационных технологий.

Значимость теоретических положений состоит в разработке нового метода поиска и принятия рациональных решений, основанного на моделировании системы управления ресурсами промышленного предприятия с помощью базовой имитационной модели, в которой созданы типовые компоненты, являющиеся общей основой для комплексного анализа процессов функционирования реальных предприятий. Разработка новых теоретических положений в совокупности является существенным научным достижением в теории управления социально-экономическими системами и имеет важное социально-экономическое и хозяйственное значение для повышения эффективности управления предприятиями.

Практическая значимость полученных результатов связана с разработкой и внедрением в реальном производстве следующих научных результатов и программных комплексов:

- 1) базовой имитационной модели функционирования промышленного предприятия с КИС, которая ускоряет адаптацию программного обеспечения имитационной модели к условиям конкретных производственных организаций;

2) программно-технологического комплекса имитации сложных систем (ПТКИ) BelSim, который сокращает временные затраты на исследование имитационных моделей за счет интеграции в КИС и автоматизации получения актуальных входных данных;

3) программного средства поиска рациональных решений, реализованного в ПТКИ BelSim, которое расширяет область применения ПТКИ BelSim за счет рационального выбора параметров системы внутрифирменного управления на основе обеспечения разработки имитационных моделей самими специалистами промышленного предприятия;

4) разработанных проблемно-ориентированных систем поддержки принятия решений для промышленных предприятий: ОАО «Могилевхимволокно», ОАО «Моготекс», ОАО «Обувь» (Республика Беларусь) и ООО «СМИТ-Ярцево» (Российская Федерация).

Методология и методы исследования. Лично автором определена методология имитационного моделирования процессов управления промышленным предприятием с корпоративной информационной системой (КИС) и системного анализа результатов имитации. На основе анализа источников определены цели и задачи исследования. Сформулировано направление дальнейшего развития метода имитационного моделирования процессным способом применительно к производственно-экономическим системам с КИС. В результате разработана базовая имитационная модель процессов производственно-экономической деятельности промышленного предприятия. Для ее реализации предложен программно-технологический комплекс имитации сложных систем со средствами интеграции в корпоративную информационную систему промышленного предприятия и ориентацией на распределенные вычисления.

Положения и результаты, выносимые на защиту:

1. Теоретические положения технологии имитационного моделирования и принятия решений в информационных системах управления промышленным предприятием, основанные на их представлении в виде многоуровневой иерархической социально-экономической системы и введении понятия ресурсов f - и p -типа (трудовых ресурсов и программных средств).

2. Метод построения имитационных моделей (ИМ), основанный на процессном способе моделирования системы управления ресурсами промышленного предприятия путем использования комплекса взаимосвязанных имитационных моделей с высоким уровнем детализации.

3. Метод решения задачи многокритериального управления построением имитационных моделей системы управления промышленного предприятия с

использованием комплекса информационных технологий и ресурсов f - и p -типа (трудовых ресурсов и программных средств), основанный на использовании принципа оптимальности Беллмана.

4. Метод поиска рациональных решений по распределению финансовых, материальных и трудовых ресурсов промышленного предприятия, основанный на имитации системы управления ресурсами с помощью базовой имитационной модели, использовании постулата совместимости координирующих решений и специальной процедуры адаптации модели алгоритма случайного поиска оптимума целевой функции с применением кластерного анализа.

5. Алгоритм количественной оценки эффективности координирующих решений в системе управления промышленного предприятия, основанный на использовании базовой имитационной модели, постулата совместимости координирующих решений и применении аксиоматического принципа Парето.

6. Программно-технологический комплекс имитации сложных систем (ПТКИ) BelSim для автоматизации задач проектного моделирования механизмов управления предприятиями, использующими корпоративную информационную систему, и программное средство реализации метода поиска рациональных решений BelSim Optimizer, реализованное в среде ПТКИ BelSim.

Обоснованность и достоверность разработанных научных положений, имитационных моделей и программных систем обеспечивается корректным применением математических методов и подтверждается результатами внедрения в производственных условиях с анализом реальных данных на заводе органического синтеза ОАО «Могилевхимволокно», в ОАО «Моготекс», в ОАО «Обувь» (Беларусь, Могилев), в ООО «СМИТ-Ярцево» (Россия, Смоленская область, Ярцево). Требуемая степень достоверности результатов подтверждена в ходе тестирования в учебном процессе ГУВПО «Белорусско-Российский университет» на кафедре автоматизированных систем управления (Беларусь, Могилев), Белорусского национального технического университета на кафедре управления научными исследованиями, проектированием, производством (Беларусь, Минск).

Апробация результатов. Основные результаты исследований докладывались, обсуждались и представлялись на следующих международных конференциях и выставках: IFIP Symposium on Large Scale Systems: Theory and Applications (Греция, Патры, 1998); Перспективные технологии и системы (Минск, 2002-2006); Международная специализированная выставка ТИБО (Минск, 2005-2007); IV Белорусско-Польский научно-практический семинар и выставка (Польша, Ольштын, 2004); Проблемы управления и приложения (Минск, 2005);

Математичне та імітаційне моделювання (Україна, Київ, 2006-2012); Моделирование–2006 (Україна, Київ, 2006); Интеллектуальные системы и Интеллектуальные САПР (Дивноморское, 2006); Актуальные проблемы математики, механики, информатики (Пермь, 2006); Computer Data Analysis and Modeling: Complex Stochastic Data and Systems (Минск, 2007); Системный анализ и информационные технологии (Україна, Київ, 2008-2011); Динамические системы: устойчивость, управление, оптимизация (DSSCO '08) (Минск, 2008); Информационные технологии в профессиональной деятельности и научной работе (Йошкар-Ола, 2008); Вычислительный интеллект (результаты, проблемы, перспективы) (Україна, Черкассы, 2011); Belarus-Korea science and technology seminar (Минск, 2011); Информационные технологии и системы (Минск, 2011); Creativity in intellectual technologies & data science (Волгоград, 2015); Инфраструктурное обеспечение бизнес-процессов в региональных социально-экономических системах (Кострома, 2016); Математические методы в технике и технологиях (Санкт-Петербург, 2016) и др.

Опубликованность результатов. Материалы диссертационной работы представлены в 112 научных публикациях, из которых: 2 монографии; 15 статей в научных журналах, рекомендованных ВАК Российской Федерации; 25 статей в изданиях, включенных в Перечень ВАК Республики Беларусь; 18 статей в других журналах и сборниках научных трудов; 20 статей в трудах конференций; 32 тезисов докладов семинаров, конференций, симпозиумов. Одна из научных публикаций включена в базу данных Scopus. Получены 4 свидетельства о регистрации компьютерных программ.

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, шести глав, заключения, библиографического списка из 225 наименований и 6 приложений. Полный объем диссертации составляет 350 страниц, включает 83 иллюстрации и 20 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ

Во введении обосновывается актуальность темы диссертации и определяются направления диссертационных исследований. Сформулированы цели и задачи исследований, определены положения, выносимые на защиту.

В первой главе определено место диссертационных исследований в теории управления социально-экономическими системами, а именно в области информационных систем, представляющих собой сложное взаимодействие человека, социальных, информационных и технических компонентов, которые

являются связующим звеном современных организационных процессов. Управление информационной системой производственной фирмы (промышленного предприятия) представляет организацию как систему ресурсов (финансов, материальных запасов, кадров).

Рассмотрены существующие концепции управления ресурсами промышленного предприятия, направленных на повышение эффективности управления предприятиями. Показано, что использование имитационного моделирования в системах управления предприятием затруднено построением модели сложной системы и отсутствием средств комплексной автоматизации построения таких моделей.

Выполнен анализ информационных технологий в корпоративной информационной системе промышленного предприятия, в котором представлены: информационные технологии (IDEF, RUP, Catalysis и др.) моделирования бизнес-процессов, информационные технологии (блок-схемы, UML) моделирования программных систем, информационные технологии (ODBC, OLE DB, JDBC и др.) доступа к данным информационной системы, программные средства (SPSS, STATA, Statistica и др.) статистической обработки данных, информационные технологии (XML, JSON, YAML и др.) обмена данными между программными системами, объектно-ориентированное программирование, поддерживаемое языками C#, C++, Java и др.; интегрированные среды (NetBeans, Sun Studio, Eclipse и др.) разработки программных систем, информационные технологии (DSM, PVM, MPI и др.) распределенных вычислений.

Приводится также аналитический обзор способов моделирования и используемых моделей промышленного предприятия, включающий в себя констатацию современного состояния имитационного моделирования промышленных объектов. На основе анализа литературных источников и докладов на научно-технических конференциях и симпозиумах определены подходы к построению моделей промышленного предприятия.

Показано, что для использования имитационных моделей применяются соответствующие технологии их реализации на ЭВМ. Каждая из технологий имитации исследуемых объектов представлена в виде трех этапов: формализация концептуальной модели объекта исследования; собственно построение математической модели объекта; операции верификации и валидации ИМ.

Следующим этапом анализа использования ИМ явился обзор применяемых методов оптимизации в имитационных экспериментах (ИЭ), который включает в себя обзоры возможностей пакетов оптимизации, используемых при имитационном моделировании, алгоритмов случайного поиска при опти-

мизации в имитационном эксперименте. На основании аналитических работ А. М. Лоу (A. M. Law), Дж. Эприла (J. April), М. С. Фу (M.C. Fu) и др. определены характеристики наиболее известных оптимизационных пакетов, применяемых в имитационном моделировании: *AutoStat*, *Evolutionary Optimizer*, *OptQuest*, *RISKOptimizer*, *WITNESS Optimizer*.

Развитие эволюционных подходов к решению оптимизационных задач в значительной мере определяется работами Д. И. Батищева, И. Л. Букатовой, Л. А. Гладкова, В. В. Курейчика, В. М. Курейчика, Л. А. Растригина, Л. Фогеля (L.J. Fogel), Дж. Холланда (John H. Holland), М. Л. Цетлина, Г. Шефеля (H. Schwefel) и др. В диссертационной работе сделан краткий анализ основных алгоритмов случайного поиска при решении сложных оптимизационных задач: грубый случайный поиск (метод Монте-Карло); генетические алгоритмы (ГА); моделируемый отжиг; поиск с запретами; эволюционные стратегии.

На основе проведенного теоретического анализа была сформулирована математическая постановка системной задачи управления сложным иерархическим объектом, в котором структурные отношения f_ℓ и обратные отношения f_ℓ^{-1} функциональных элементов (ФЭ) между разными иерархическими уровнями, а также внутриуровневые структурные отношения $f_{\ell p}$ и обратные отношения $f_{\ell p}^{-1}$ определены в виде:

$$f_\ell : V_L \rightarrow \bigcup_{\ell=1}^L V_\ell; \quad f_{\ell p} : V_\ell \rightarrow \bigcup_{p=1}^{P_0} V_{\ell p}; \quad (1)$$

$$f_{\ell p}^{-1} : \bigcup_{p=1}^{P_0} V_{\ell p} \rightarrow V_\ell; \quad f_\ell^{-1} : \bigcup_{\ell=1}^L V_\ell \rightarrow V_L. \quad (2)$$

где V_L – множество ФЭ объекта в целом (L - количество уровней); V_ℓ – множество ФЭ ℓ -го иерархического уровня; $V_{\ell p}$ – p -й функциональный элемент ℓ -го иерархического уровня (P_0 - количество ФЭ на ℓ -м уровне).

На основании анализа представленной выше информации определена актуальность темы диссертационного исследования, обусловленная неприспособленностью средств имитационного моделирования для применения в информационной системе промышленных предприятий из-за отсутствия полностью или в частичной мере возможностей коллективного управления проектом имитационной модели сложного многоуровневого объекта, средств распределенных вычислений, встроенных средств оптимизации, отсутствием средств интеграции с корпоративной информационной системой управления ресурсами предприятия.

Во второй главе приведены результаты разработки и исследования общего метода поиска рациональных решений в информационных системах управления ресурсами на основе эксплуатации ИМ промышленного предприятия (рисунок 1).

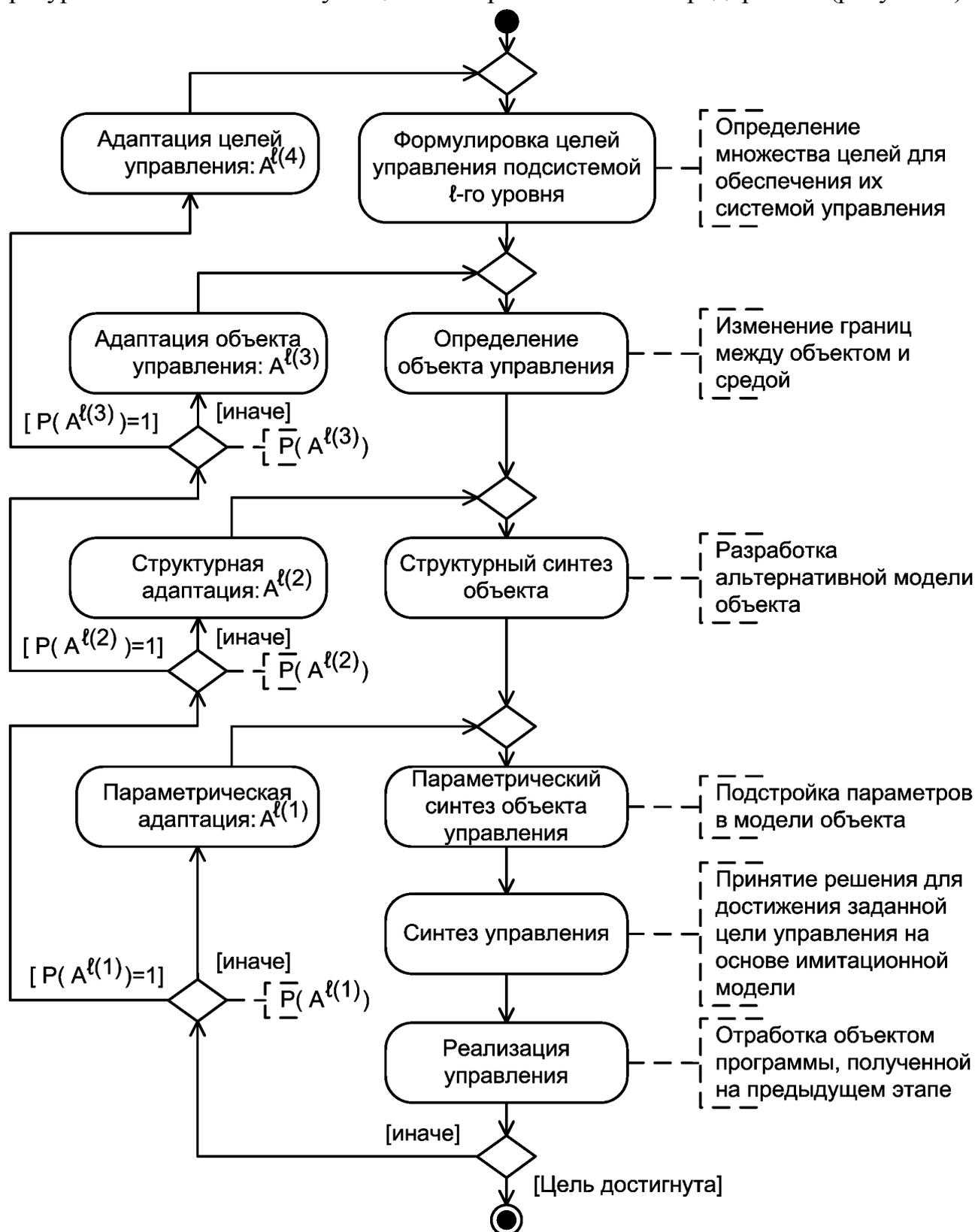


Рисунок 1 – Этапы поиска рациональных решений при эксплуатации имитационной модели (ИМ) в информационной системе предприятия

Метод поиска рациональных решений был основан на выполнении последовательности следующих этапов эксплуатации ИМ: формулировка целей управления предприятием; определение объекта управления, во время которого эксперты синтезируют несколько вариантов объекта, затем оценивают по одному или нескольким критериям и выбирают лучший; структурный синтез ИМ, включающий в себя определение входов и выходов объекта, экспертное ранжирование важности входов и выходов, декомпозицию модели и выбор структурных элементов модели (см. рисунок 1). Параметрический синтез ИМ связан с определением ее параметров при выбранной структуре (для определения параметров модели необходимо иметь информацию о поведении неуправляемых, управляемых входов и состоянии объекта); выбор алгоритма принятия решений (полученное управление должно быть оптимально с точки зрения целей управления и представлять собой программу изменения управляемых параметров во времени). Возможны четыре уровня коррекции модели системы управления: параметрическая $A^{\ell(1)}$, структурная адаптация $A^{\ell(2)}$, адаптация объекта $A^{\ell(3)}$ и целей управления $A^{\ell(4)}$ (см. рисунок 1, где $P(A^{\ell(i)})$ – соответствующий предикат для $A^{\ell(i)}$, $i = 1, \dots, 4$).

Анализируемая имитационная модель M промышленного предприятия может быть задана набором

$$M = \langle X_M, Y_M, A_M, Def_M \rangle, \quad (3)$$

где X_M – множество входных параметров модели с пространством значений SX_M входных параметров модели M , Y_M – множество откликов модели с пространством значений SY_M откликов модели M , A_M – алгоритм работы имитационной модели: $A_M: SX_M \rightarrow SY_M$; Def_M – область ограничений имитационной модели M .

На этапе использования и исследования имитационной модели M возникает необходимость в изучении ее свойств, что выражается в нахождении значений SX_M параметров модели, обеспечивающих эти свойства. При решении класса подобных задач часто используются методы оптимизации, основанные на случайном поиске. Важными признаками данного класса алгоритмов являются универсальность и простота применения к конкретной задаче. Однако такие алгоритмы A_{AO} оптимизации обладают рядом недостатков: повышенные требования к вычислительным ресурсам по сравнению с методами, специально спроектированным для решения определенных проблем; отсутствие гарантии нахождения

ния глобального оптимума; сложность реализации, что требует их самостоятельного исследования для применения в имитационном моделировании.

Алгоритм A_{AO} оптимизации, основанный на случайном поиске, можно реализовать с помощью генетического алгоритма (ГА). Структуру ГА определяют операторы репродукции, к которым относятся: селекция на основе заданной шкалы, элитная, турнирная. Существует множество операторов кроссинговера: простой, двухточечный, упорядоченный, частично-соответствующий, циклический, универсальный. К операторам мутации относятся: двухточечный, строительные блоки. Известны операторы транслокации, транспозиции, сегрегации, удаления, вставки, редукции, рекомбинации. Поэтому в ходе структурного синтеза исследователь получает не одну структуру реализации алгоритма A_{AO} , а некоторое их множество $\{St_i\}$. Множество $P_{AO} = \{C_i\}$ параметров настройки ГА: C_1 – вероятность кроссинговера, C_2 – вероятность мутации, C_3 – доля родителей от размера популяции, C_4 – математическое ожидание для распределения количества точек разрыва. Таким образом, можно рассматривать несколько моделей алгоритмов случайного поиска.

Оптимальное решение SX_M^* с погрешностью ε_{AO} задачи оптимизации ZO на основе модели M с использованием алгоритма оптимизации A_{AO} , настроенного в соответствии с множеством P_{AO} параметров настройки, можно представить следующим образом:

$$SX_M^* = A_{AO}(SX_{ZO}), \max_{SX_{ZO}}(F_{ZO} - \Phi_{ZO}^*) \leq \varepsilon_{AO}, \quad (4)$$

где Φ_{ZO}^* – оптимальное значение целевой функции F_{ZO} ; SX_{ZO} – значения параметров задачи оптимизации, $SX_{ZO} \subset SX_M$.

При проектировании алгоритма случайного поиска оптимальных решений выделен этап структурного синтеза, целью которого является определение структуры St алгоритма, и этап параметрического синтеза, целью которого является определение вектора параметров C из множества параметров P_{AO} . Рассматривается проблема выбора набора тестовых функций для исследования проектируемого алгоритма случайного поиска на примере генетического алгоритма (ГА). Предложено использовать специально разработанные функции, имитирующие наиболее сложные ситуации для ГА при поиске оптимума, для которых в качестве параметров выступает бинарная строка – значение SX_{ZO} исследуемого параметра в двоичном коде.

Сформулирована целевая функция оценки эффективности взаимодействия компонентов предприятия и определены основные показатели производ-

ственно-экономической деятельности, которые позволяют дать общую оценку эффективности функционирования системы управления исследуемого объекта.

Интегральная целевая функция F_{ZO} производственно-экономической деятельности предприятия представлена линейной моделью с весовыми коэффициентами.

Деятельность промышленных предприятий, рассмотренная в работах В. Н. Буркова, М. Месаровича, Д. А. Новикова и др., представлена многоуровневой иерархической структурой, в которой вводится понятие координации. Для определения наилучшего решения на каждом из уровней используется *постулат совместимости* координирующих решений, в соответствии с которым решение полагают оптимальным, если оно удовлетворяет не только целевой функции исследуемой подсистемы, но и согласуется с глобальной целью системы.

При решении многокритериальных задач с применением строго сформулированного на основе аксиоматического метода В. Д. Ногиным принципа Парето и постулата совместимости впервые решена задача количественной оценки координирующих действий в иерархической системе. При этом постулат совместимости представлен в виде

$$P[(x' \succ_{\ell} x'')^{\ell} \Rightarrow (y' \succ_{\ell} y'')^{\ell}) \wedge (x' \succ_{\ell} x'')^{\ell} \Rightarrow (y' \succ_0 y'')^0] = 1, \quad (5)$$

где x', x'' – исследуемые варианты решений на ℓ -уровне и соответствующие им критерии эффективности y', y'' на ℓ - и 0-уровне.

В итоге получаются два множества Парето-оптимальных векторов на ℓ -уровне $P(Y)^{\ell}$ и 0-уровне $P(Y)^0$ глобальной цели. Этим множествам в общем случае соответствуют два множества Парето-оптимальных решений на ℓ -уровне: $P_f(X)_{\ell}$ и $P_f(X)_0$. При этом возможны следующие варианты:

а) $P_f(X)_{\ell} \cap P_f(X)_0 = \emptyset$ (полная несовместимость);

б) $P_f(X)_{\ell} \cap P_f(X)_0 \neq \emptyset$ (частичная совместимость);

в) $P_f(X)_{\ell} \cap P_f(X)_0 = P_f(X)_{\ell} = P_f(X)_0$ (абсолютная совместимость при выполнении постулата совместимости). Таким образом, появляется возможность количественной оценки координирующих действий в иерархической системе.

Изложенная методика была использована при решении многокритериальных задач управления ресурсами предприятия с использованием рассмотренного принципа Парето и алгоритма построения множества Парето-оптимальных векторов $\{Y\}$. Используя информацию об относительной важности критериев оптимизации, множество решений Парето существенно сужается, благодаря применению алгоритма построения оценки сверху в случае ко-

нечного множества откликов $\{Y\}$, который реализован последовательностью шагов формирования множества недоминируемых векторов $N_{dom}Y$.

В третьей главе разработаны теоретические основы проектирования имитационных моделей внутрифирменного управления в информационной системе предприятия. Предложена идея метода построения имитационной модели для системы управления ресурсами предприятия: реализация метода предполагает построение базовой ИМ функционирования промышленного предприятия с учетом его структуры управления (декомпозиции отдельных содержательных блоков и связанных с ними функций структурных подразделений, допускающих формальное описание, и построение их оптимизационных моделей) и последующим уточнением в модели объектов системы следующей последовательностью этапов с комплексным использованием информационных технологий КИС.

Этап 1. Построение вербальной модели исследуемого объекта системы с помощью UML-диаграмм анализа уровней и методологии SADT (Structured Analysis and Design Technique). Формируется представление о структуре системы управления.

Этап 2. Построение концептуальных моделей каждого уровня детализации с использованием методологии функционального моделирования SADT.

Этап 3. Проверка правильности концептуальной модели; если для какого-либо из уровней концептуальная модель не прошла валидацию (соответствие модели реальному объекту), имеет место возврат на предыдущий этап.

Этап 4. Создание формальной модели исследуемой системы с применением процессного способа имитации путем составления и описания алгоритмов процессов и отношений между ними. Решаются вопросы синхронизации процессов и их взаимодействия с управляющей программой моделирования (УПМ), задания начальных условий, организации сбора статистики и окончания имитации.

Этап 5. Построение ИМ системы за счет добавления алгоритмов сбора статистики имитации и построения алгоритмов обработки статистических записей имитации динамики взаимодействия процессов ИМ с применением диаграмм деятельности UML.

Этап 6. Программирование на каждом уровне детализации ИМ с применением методологии объектно-ориентированного программирования. Это позволяет создавать библиотеку моделей объектов системы, расширять их функциональные возможности на этапе эксплуатации базовой ИМ.

Этап 7. Верификация программы ИМ, состоящая в проверке правильности функционирования программы замыслу исследователя.

Этап 8. После успешной верификации программы ИМ планирование имитационных экспериментов (ИЭ), мониторинг прототипов объекта имитации для получения исходной информации с применением XML-технологии ввода данных в модель из корпоративной информационной системы предприятия.

Этап 9. Испытание ИМ и технологических характеристик программы модели с использованием пакетов статистической обработки данных ИЭ.

Этап 10. Проведение серий ИЭ согласно процедуре Монте-Карло и усреднение значений откликов при каждой комбинации параметров ИМ.

Этап 11. Анализ оперативной статистики имитации и модификация значений параметров ИМ согласно планам постановки ИЭ.

Этап 12. Формирование матриц решений, выбор критериев оценки рационального состава параметров ИМ и определение оптимального варианта организации моделируемой системы и рационального состава ресурсов предприятия при эксплуатации имитационной модели.

В общем случае на каждом из этапов при проектировании и эксплуатации ИМ выполняются операторы F_i ($i = 1, \dots, n$, где n – общее число этапов), реализующие множество функций $SF_i = \{f_{ik} \mid f_{ik} \in F_i, k = 1, \dots, |SF_i|\}$ (f_{ik} – функции оператора F_i).

Например, этапы с первого по девятый, при решении практической имитационной задачи используют следующие информационные технологии:

$$IDEF0 \xrightarrow{R1} UML \xrightarrow{R2} C++ \xrightarrow{R3} ADO \xrightarrow{R4} STATISTICA \quad (6)$$

На этапах проведения исследований ИМ и ее эксплуатации используются информационные технологии, повышающие их эффективность:

$$STATISTICA \xrightarrow{R5} MPI \xrightarrow{R6} STATISTICA \xrightarrow{R7} Solver MS Excel \quad (7)$$

В преобразованиях (6) и (7) отношения R_k ($k = 1, \dots, 7$) между этапами реализуются информационными технологиями и соответствующими CASE-средствами. Например, $R1: \{F1, F2, F3\} \rightarrow \{F4, F5\}$; $R2: \{F4, F5\} \rightarrow \{F6, F7\}$ и др. Для автоматизации построения и эксплуатации ИМ могут быть предложены и другие варианты с учетом особенностей эксплуатации имитационной модели в условиях КИС реального предприятия.

Предложен метод многокритериального управления построением имитационных моделей с использованием комплекса информационных технологий КИС и учетом ресурсов f - и p -типа (трудовых ресурсов и используемых ими программных средств для создания и эксплуатации ИМ), основанного на использовании принципа оптимальности Беллмана, в соответствии с которым показана возможность представления этапов построения ИМ в виде взвешенного

ориентированного ациклического графа с нагрузками на дуги графа в виде стоимости ресурсов и/или временных затрат на каждом этапе.

Итерационный процесс *ItPr* проектирования, разработки и эксплуатации имитационной модели (программного средства) состоит из n фиксированных этапов:

$$ItPr \stackrel{def}{=} \{Sp_i / i = 1, \dots, n\}. \quad (8)$$

Этапы Sp_i , $i = 1, \dots, n$, выполняются последовательно.

Каждый из этапов Sp_i допускает выбор одного из допустимых состояний $FP_{R(i,k)}$, определяемых использованием трудового ресурса (ресурса f -типа) и одного из видов допустимого программного обеспечения (ресурса p -типа) на i -м этапе (рисунок 2). Себестоимости отдельных состояний $FP_{R(i,k)}$ складываются из стоимостей используемых ресурсов. Время, затрачиваемое на обработку информации в отдельных состояниях, зависит в частности от знаний, умений, навыков (квалификации) трудового ресурса (ресурса f -типа) и функциональных возможностей программных средств (ресурсов p -типа).

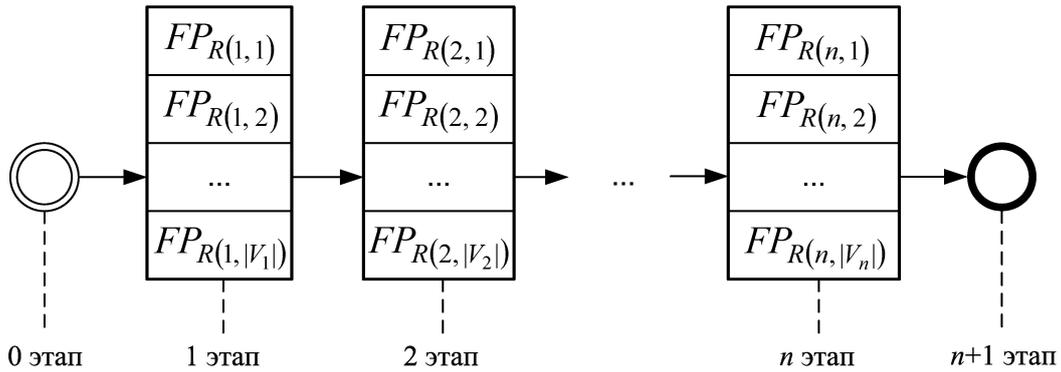


Рисунок 2 – Последовательность этапов проектирования, разработки и эксплуатации имитационной модели

$$Sp_i \stackrel{def}{=} \{FP_{R(i,k)} \mid k = 1, \dots, |V_i|\}, \quad i = 1, \dots, n; \quad (9)$$

$$R(i,k) \stackrel{def}{=} (i, f_{ik}, p_{ik}, k),$$

где $R(i,k)$ в (9) – вектор-идентификатор номера состояния, включающий порядковый номер этапа Sp_i : i , $i \in \{1, \dots, n\}$; код используемого ресурса f -типа f_{ik} , $f_{ik} \in \{1, \dots, |f|\}$; порядковый номер используемого ресурса p -типа p_{ik} , $p_{ik} \in \{1, \dots, |p|\}$; порядковый номер состояния в пределах нумерации состояний этапа Sp_i : k , $k \in \{1, \dots, |V_i|\}$, в свою очередь $|V_i|$ – мощность множества номеров состояний на i -м этапе *ItPr*.

Итерационный процесс (8) представлен нагруженным ориентированным ациклическим графом (рисунок 3), вершинами которого являются состояния (9). Для представления в виде графа *ItPr* (8) разделяется на n этапов. Исток графа условно определяет нулевой этап *ItPr* (8). Вершины нумеруются последовательно от истока (0 этап) к стоку ($n+1$ этап) и соединяются дугами в соответствии с порядком следования этапов (см. рисунок 2).

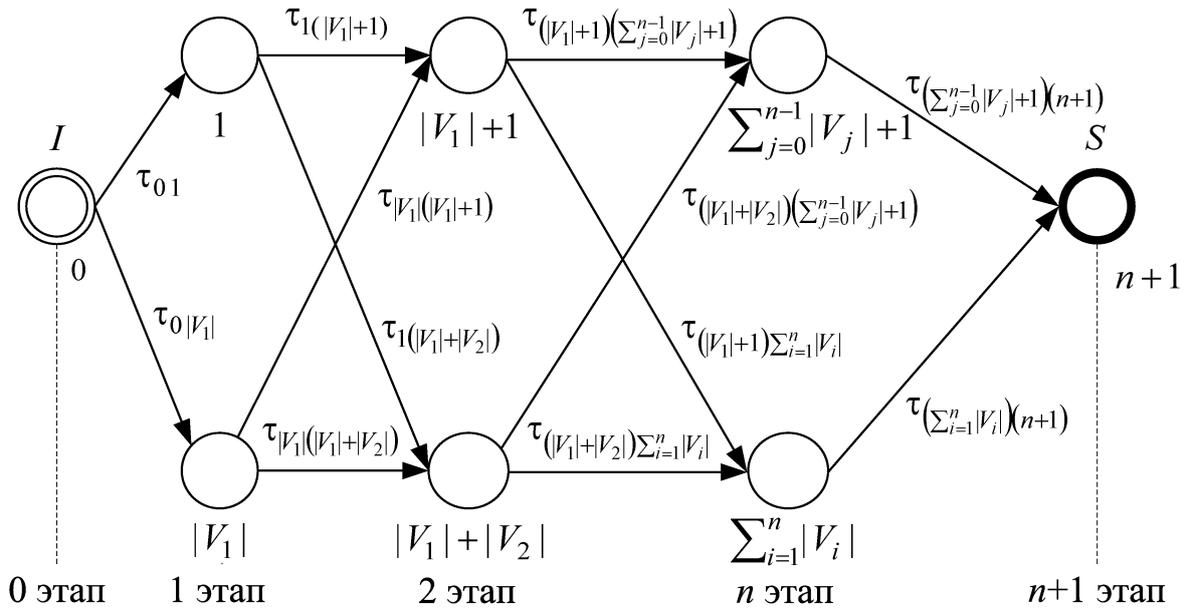


Рисунок 3 – Нагрузки на дуги ориентированного графа

Обозначим через τ_{uv} нагрузку на дугу графа (см. рисунок 3), исходящую из вершины с номером $u \in V_{i-1}$ и входящую в вершину с номером $v \in V_i$, где V_i – множество номеров вершин для i -го этапа графа *ItPr* (8):

$$V_i \stackrel{def}{=} \left\{ \sum_{j=0}^{i-1} |V_j| + 1, \sum_{j=0}^{i-1} |V_j| + 2, \dots, \sum_{j=0}^i |V_j| \right\}, \quad i = 1, \dots, n. \quad (10)$$

Пусть нагрузки τ_{uv} интерпретируются как временные затраты и/или стоимости затрат ресурсов на обработку информации при решении одной имитационной задачи в соответствии с состояниями $FP_{R(u,v)}$ (9) итерационного процесса *ItPr* (8).

Нагруженные дуги, исходящие из одних и тех же вершин, эквивалентны ввиду особенностей временных и/или стоимостных затрат для одного и того же *ItPr* (8) построения имитационной модели (создания программного средства). Пусть $\tau_{uv} \in R$ (τ_{uv} являются вещественными числами, задающими один

критерий оптимизации – временные затраты или стоимости затрат ресурсов), тогда для *ItPr* (8) верны равенства вида

$$\forall u \in V_{i-1} \forall v_1 v_2 \in V_i [\tau_{uv_1} = \tau_{uv_2}], i = 1, \dots, n, \quad (11)$$

т.е. нагрузки на дугах, исходящих из одного состояния предыдущего этапа в состоянии следующего этапа, совпадают.

Пусть для $\tau_{uv} \in R$ имеют место соотношения вида (11), тогда для рассматриваемой задачи функциональное уравнение Беллмана принимает вид:

$$\tau_v = L_i = L_{i-1} + \min_{u \in V_{i-1}} (\max) \{ \tau_{uv} \}, \quad (12)$$

где L_i – оптимальное состояние на i -м этапе, $L_i \in R$, $L_0 = \tau_0 = 0, u \in V_{i-1}, v \in V_i, i = 1, \dots, n$.

Пусть $\tau_{uv} = (\tau_{uv}^{(1)}, \tau_{uv}^{(2)}) \in R^2$, $pOpt$ – параметр наивысшего приоритета критериев оптимизации *ItPr* (8) по 1-му (времени), либо 2-му (стоимости ресурсов) измерениям векторов $\tau_{uv} \in R^2$; $Fm_1, Fm_2 \in \{\min, \max\}$ – лексикографически упорядоченные параметром $pOpt$ критерии оптимизации *ItPr* по 1-му, 2-му измерениям векторов состояний на этапах *ItPr*, соответственно. Тогда с учетом (11) для рассматриваемой задачи из уравнения Беллмана при лексикографическом упорядочивании критериев оптимизации $pOpt = 1, 2$:

$$L_i = \begin{cases} L_{(i-1)1} + Fm_1 \{ \tau_{uv}^{(1)} \}; \\ L_{(i-1)2} + Fm_2 \left\{ \tau_{u_i v}^{(2)} \mid \tau_{u_i v}^{(1)} = Fm_1 \left(\{ \tau_{uv}^{(1)} \} \right) \right\} \end{cases}, \quad (13)$$

при лексикографическом упорядочивании критериев оптимизации $pOpt = 2, 1$:

$$L_i = \begin{cases} L_{(i-1)1} + Fm_1 \left\{ \tau_{u_i v}^{(1)} \mid \tau_{u_i v}^{(2)} = Fm_2 \left(\{ \tau_{uv}^{(2)} \} \right) \right\}; \\ L_{(i-1)2} + Fm_2 \{ \tau_{uv}^{(2)} \} \end{cases}, \quad (14)$$

где $L_i = (L_{i1} \quad L_{i2})^T$, $L_0 = (0 \quad 0)^T$, $u \in V_{i-1}, v \in V_i$,

Выбор последовательности оптимальных управлений (оптимальных состояний для *ItPr*, либо оптимального маршрута по графу) определяется последовательностью предикатов вида:

$$Fl \stackrel{def}{=} \{fl_{ij} \mid fl_{ij} \in \{True, False\}, i = 1, \dots, n, j = 1, \dots, /V_i |\}, \quad (15)$$

выбирающих оптимальное состояние на каждом из этапов.

При разработке базовой имитационной модели (БИМ) функционирования предприятия в соответствии со стандартом *MRP II* использован системный подход к анализу сложной многоуровневой системы. Рассмотрены процессы внутрифирменного управления: снабжение, организация производства, сбыт продукции и управление финансами предприятия, дано описание его окружающей среды. Процессы представлены следующими группами параметров: характеристики производственного процесса; показатели текущего финансово-экономического состояния предприятия; алгоритмы функционирования системы управления предприятием; структура персонала и параметры системы оплаты труда; характеристики производственных фондов; характеристики финансовых ресурсов; описатели контрактов; параметры системы налогообложения; показатели денежно-кредитной системы государства; характеристики спроса на продукцию; характеристики предложения материальных и энергетических ресурсов.

Предлагаемая базовая имитационная модель была ориентирована, в первую очередь, на малые и средние предприятия нефтехимической и химической промышленности, легкого машиностроения, строительной индустрии, текстильной и легкой промышленности, деревообрабатывающих и целлюлозно-бумажных предприятий. В соответствии с ограничениями модели такие предприятия по характеру процесса переработки сырья могут быть с непрерывным и прерывным процессами производства, по типу производства – массового и серийного. Если предприятие имеет дискретный тип производства, т.е. когда для выпускаемых изделий имеется ведомость материалов и состав изделия, то использование *MRP* системы является логичным и целесообразным. Если предприятие имеет процессное производство, то применение *MRP* функциональности оправдано только в случае длительного производственного цикла.

Рассмотрены задачи, которые решаются с помощью базовой ИМ функционирования промышленного предприятия: оценка влияния алгоритмов организации бизнес-процессов в информационной системе (ИС) предприятия и их параметров на показатели эффективности; рациональный выбор состава, структуры и параметров системы управления производственными процессами; оптимальное распределение производственной нагрузки по цехам промышленного предприятия и др.

Глава 4 посвящена описанию разработанного программно-технологического комплекса для реализации метода построения имитационных

моделей в информационной системе предприятия (рисунок 4). Назначение компонентов программно-технологического комплекса BelSim представлено в таблице 1.

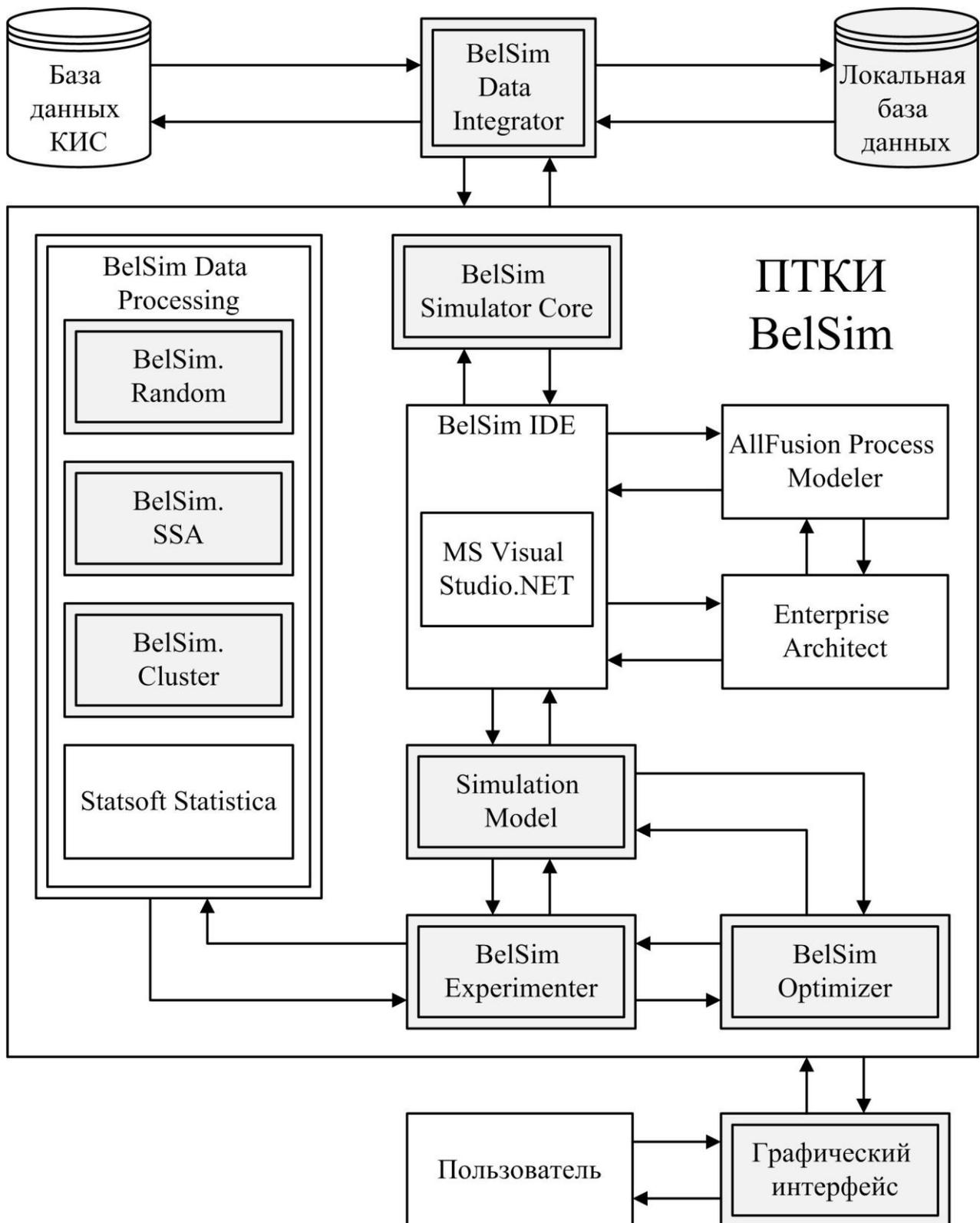


Рисунок 4 – Структура программно-технологического комплекса имитации сложных систем BelSim

Таблица 1 – Основные компоненты разработанного программно-технологического комплекса имитации сложных систем BelSim

Наименование	Назначение
BelSim IDE	Интегрированная среда разработки с использованием программы MS Visual Studio.NET
BelSim Simulator Core	Система имитационного моделирования на основе процессного способа имитации
AllFusion Process Modeler	Коммерческий программный продукт для разработки концептуальных IDEF моделей
Enterprise Architect	Коммерческий программный продукт для разработки моделей на основе унифицированного языка моделирования UML
BelSim Data Processing: 1 BelSim.Random; 2 BelSim.SSA; 3 BelSim Cluster; 4 Statsoft Statistica	Подсистема обработки входных данных модели и результатов имитационных экспериментов, включающая: - модуль обработки статистических данных; - модуль обработки числовых последовательностей данных; - модуль кластеризации многомерных данных; - коммерческий пакет программ для статистической обработки данных
Simulation Model	Базовая имитационная модель
BelSim Experimenter	Компонент для проведения имитационных экспериментов
BelSim Optimizer	Компонент для решения оптимизационных задач на основе алгоритмов случайного поиска
BelSim Data Integrator	Компонент для интеграции с корпоративной информационной системой предприятия

Программно-технологический комплекс имитации (ПТКИ) сложных систем BelSim с открытой архитектурой (см. рисунок 4) обеспечивает сокращение временных затрат на проведение имитационных экспериментов за счет интеграции в КИС и автоматизации получения актуальных входных данных, применения распределенных вычислений; коллективного управления проектом имитационной модели; эффективной обработки численных данных, накопленных в КИС, и применения результатов обработки этих данных в имитационной модели.

В состав ПТКИ BelSim вошло программное обеспечение (ПО) для: автоматизации разработки функциональной модели системы, представленной в нотации *IDEF0*; построения имитационных моделей на основе процессного способа имитации; реализации моделей в составе интегрированной среды разработки приложений на языке *C++*; планирования, организации и обработки результатов имитационных экспериментов (ИЭ); решения оптимизационных задач; анализа и представления данных для принятия проектных решений. При этом, в отличие от известных систем имитационного моделирования, исполь-

зуются готовые коммерческие программные продукты, имеющиеся в информационной системе предприятия (см. таблицу 1).

BelSim IDE (см. рисунок 4) использует коммерческую программную систему Microsoft Visual Studio .NET для реализации приложений на языке C++.

Подсистема BelSim Experimenter предназначена для автоматизации планирования, проведения и обработки результатов имитационных экспериментов (ИЭ). В подсистеме BelSim Experimenter для планирования ИЭ создано приложение *ExperimentDesigner* на основе Microsoft .NET Framework. Для обработки результатов ИЭ разработан программный модуль *ExperimentData* для статистического пакета *Statistica*, входящего в состав подсистемы BelSim Data Processing (см. рисунок 4). Анализ данных при статистической обработке и наглядное представление результатов имитации можно выполнить с использованием любого пакета статистического анализа, позволяющего осуществлять импорт данных из внешних источников аналогично, например, пакету *Statistica* фирмы StatSoft Inc.

Представлена технология организации распределенных вычислений в BelSim Experimenter для сокращения времени проведения имитационных экспериментов. Для этого используется библиотека MPI функций обмена данными между процессами, реализованными для языка C++, которые представлены системой MPICH.

Разработана структура XML-файла данных ИЭ, позволяющая организовать вторичную обработку статистики имитации для вычисления откликов ИМ. Предложена универсальная схема постановки ИЭ.

Система моделирования (СМ) BelSim Simulator Core (рисунок 5) представляет собой расширение стандартных средств языка C++.

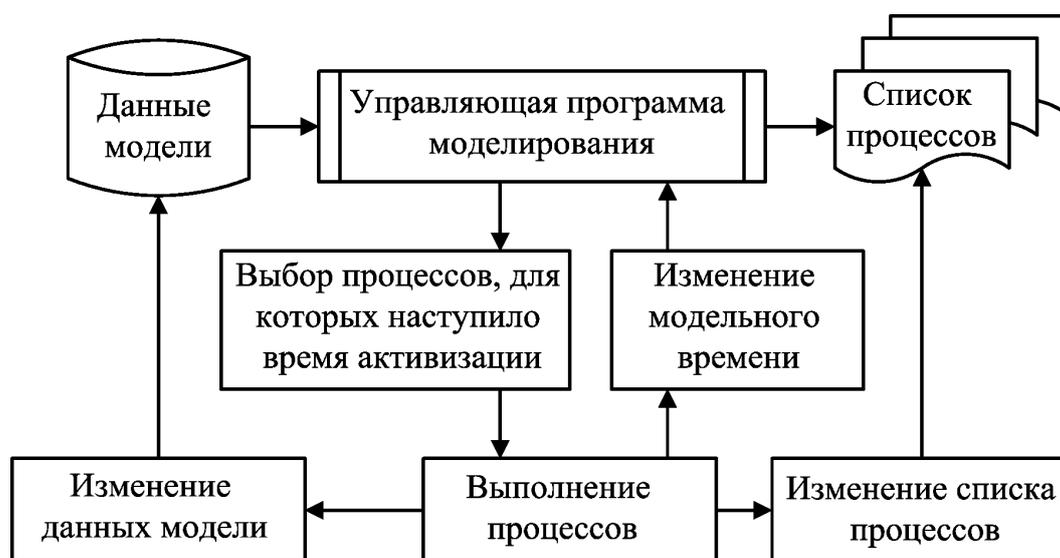


Рисунок 5 – Реализация имитационной модели в BelSim Simulator Core

При проектировании СМ BelSim Simulator Core в основу положен принцип открытости, что в результате позволяет без каких-либо ограничений расширять его функциональные возможности. Основным элементом СМ является управляющая программа моделирования (УПМ) (см. рисунок 5).

Предлагается технология построения алгоритмов ИМ, состоящая из основных этапов: *создание процессов* с помощью оператора CREATE_PROCESS и оператора запуска цикла имитации RUN; *синхронизация процессов* и их взаимодействия с УПМ путем реализации двух функций: внутренней синхронизации процессов и синхронизации межпроцессных взаимодействий. Собственно синхронизация осуществляется с помощью типового набора операторов взаимодействия процессов с УПМ. Излагается технология программирования ИМ в среде СМ BelSim Simulator Core. Приведено описание программной реализации базовой ИМ промышленного предприятия, список глобальных данных ИМ и перечень классов активностей.

Приведено описание средства интеграции с корпоративной информационной системой (КИС) предприятия BelSim Data Integrator (см. рисунок 4). Для интеграции ПТКИ BelSim с КИС выполняется следующая последовательность действий исследователя: настройка параметров для подключения к базе данных КИС; получение требуемых данных в соответствии с параметрами подключения; заполнение структуры XML-файла данными из массивов строк; передача сформированного файла в ПТКИ BelSim. Подключение к базам данных КИС реализовано с использованием информационной технологии ADO, доступ к классам которой выполняется через COM-интерфейс.

Для автоматизации процедуры принятия решений используется специальное ПО BelSim Data Processing обработки результатов имитационных экспериментов (см. таблицу 1). В структуру BelSim Data Processing включены блоки предварительной статистической обработки; кластерного анализа экспериментальных данных BelSim Cluster.

При исследовании статистических данных результатов производственной деятельности предприятия кластеризация позволяет выполнить группировку данных по заданному признаку, выявить состояния объекта с эквивалентными тенденциями поведения при решении задачи выбора оптимальных технологических режимов, что необходимо для принятия решений в реальных условиях производства.

ПТКИ BelSim реализован по принципу открытости, что позволяет использовать, например для решения задачи кластеризации многомерных данных, различные программные средства. В случае кластеризации (см. рисунок 6) используются три метода: Fuzzy Relation Clustering (FRC), реализованный в

BelSim Cluster, и методы K-Means, Tree Clustering, реализованные в статистическом пакете Statistica.

Открытая архитектура ПТКИ BelSim позволяет применять новые методы обработки данных, реализованные, например в BelSim.SSA, для извлечения дополнительной информации из числовых последовательностей данных на основе метода анализа сингулярного спектра (ССА). Метод ССА позволяет выявить особенности динамики исследуемого объекта путем разделения последовательности числовых данных на периодическую и трендовую составляющую.

В пятой главе приведено описание программного средства BelSim Optimizer («Оптимизатор») для реализации метода поиска рациональных решений. BelSim Optimizer («Оптимизатор») реализует алгоритм оптимизации и взаимодействует с одной стороны с исследователем, указывающим список параметров и вид целевой функции, а с другой стороны с базовой ИМ предприятия (рисунок 6).

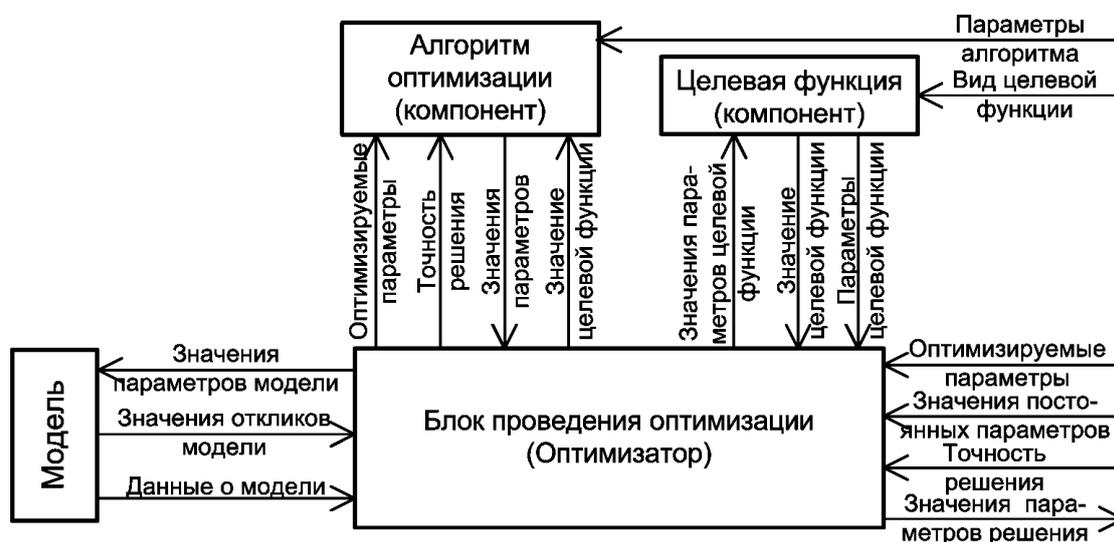


Рисунок 6 – Схема потоков данных в системе «Оптимизатор»

Из ИМ поступают: значения откликов, определенные по методу Монте-Карло, и результаты имитации вариантов организации системы управления. На входе подсистемы BelSim Optimizer исследователь задает список параметров, которые подлежат оптимизации; список постоянных параметров, и необходимую точность нахождения оптимума. На выходе подсистема возвращает исследователю оптимальные значения параметров решения задачи оптимизации.

Одним из этапов методики настройки алгоритма оптимизации (АО) в BelSim Optimizer является определение классов целевых функций (ЦФ) с эквивалентным поведением АО.

Пусть при многокритериальном управлении задано множество ЦФ $\{F_{ZOi}\}, i=1, \dots, n$ и АО с t параметрами и r откликами. Чувствительность откликов АО при изменении значений параметров для заданной ЦФ разная, что

значительно влияет на длительность поиска оптимального решения. Требуется разделить ЦФ на непересекающиеся подмножества (классы), в пределах которых результаты анализа чувствительности эквивалентны.

Методика определения классов целевых функций представлена следующими действиями:

Шаг 1. Предварительный анализ АО.

Выполняется исследование чувствительности откликов АО при варьировании значений параметров АО для каждой ЦФ с формированием матрицы S :

$$S = \|s_{ij}\|, s_{ij} \in R, i = 1, \dots, r, j = 1, \dots, m, \quad (16)$$

где s_{ij} – чувствительность i -го отклика при изменении j -го параметра АО.

Для проведения кластерного анализа матрицы вида (16) преобразуются к вектору вида:

$$S = (s_{11}, s_{12}, \dots, s_{1m}, \dots, s_{r1}, \dots, s_{rm}). \quad (17)$$

В итоге для каждой ЦФ $\{F_{ZOi}\}, i = 1, \dots, n$ проводится t раз анализ чувствительности и получается множество векторов вида (17):

$$\{S_i\}, i = 1, \dots, t \cdot n. \quad (18)$$

Шаг 2. Кластерный анализ.

В результате разбиения множества (18) на k классов каждый из нескольких методов кластеризации ставит в соответствие номерам $i = 1, \dots, t \cdot n$ элементов множества (18) соответствующие им номера классов $K_j, j = 1, \dots, k$.

Шаг 3. Интерпретация результатов кластерного анализа.

Поскольку векторы $S_i \in R^{m \cdot r}, i = 1, \dots, t \cdot n$ кластеризуемого множества (18) представляют собой результаты статистической обработки экспериментальных данных n ЦФ, то итог кластеризации множества (18) можно представить в виде матрицы относительных частот принадлежности ЦФ определенным классам:

$$P = \|p_{ij}\|, i = 1, \dots, n, j = 1, \dots, k, \quad (19)$$

где i – номер ЦФ, j – номер класса K_j, k – количество классов, $p_{ij} \in [0, 1]$ – относительная частота принадлежности i -й ЦФ классу K_j .

Шаг 4. Обобщение итогов кластеризации разными методами.

Пусть P_1, P_2, P_3 – матрицы вида (19) относительных частот принадлежности ЦФ $F_{ZOi}, i = 1, \dots, n$ определенным классам в соответствии с методами кластерного анализа K-Means, Tree Clustering, FRC, соответственно. Тогда значения элементов $p_{ij} \in [0, 1]$ обобщенной матрицы P могут быть найдены по сле-

дующей формуле (на элементы строк обобщенной матрицы P налагается условие равенства единице их суммы):

$$P_{ij} = \begin{cases} (1 - p_{1ij})p_{2ij}p_{3ij} + p_{1ij}(1 - p_{2ij})p_{3ij} + p_{1ij}p_{2ij}(1 - p_{3ij}) + p_{1ij}p_{2ij}p_{3ij}, & j < k; \\ 1 - \sum_{j=1}^{k-1} p_{ij}, & j = k. \end{cases} \quad (20)$$

Обобщаемые матрицы P_1, P_2, P_3 должны иметь одну размерность. В случае разбиения множества (18) на $k_1 \leq k, k_2 \leq k, k_3 \leq k$ классов, необходимо предварительно привести матрицы P_1, P_2, P_3 к одной размерности $k = \max\{k_1, k_2, k_3\}$. Приведение матрицы к необходимой размерности возможно за счет ее дополнения столбцами с нулевыми относительными частотами попадания объекта в добавленные классы.

Эксплуатация имитационных моделей в производственных условиях затруднена отсутствием методов обработки накопленных данных и подготовки их для использования в моделях. Для повышения эффективности принятия решений при эксплуатации имитационной модели предложена методика использования в имитационном моделировании сингулярного спектрального анализа (ССА) числовых последовательностей для получения дополнительной информации о структуре данных в результате разложения исследуемой последовательности на трендовую, периодическую и шумовую составляющие. Технология применения BelSim.Random и BelSim.SSA была использована при анализе эмпирических данных, хранящихся в КИС предприятия, для установления путей снижения себестоимости продукции.

В шестой главе приведены результаты апробации базовой имитационной модели, ПТКИ BelSim и метода поиска рациональных решений для ряда задач в информационной системе управления промышленным предприятием.

В ходе апробации метода поиска рациональных решений была решена задача оптимизации производственной нагрузки цехов завода органического синтеза ОАО «Могилевхимволокно». ИМ производственного процесса (ПП) реализована на основе процессного способа имитации. Было проведено исследование ИМ непрерывного ПП. По результатам имитационных экспериментов (ИЭ) были построены зависимости себестоимости продукции одновременно от выработки двух типов ресурсов и зависимости количества выпущенной продукции одновременно от выработки тех же двух типов ресурсов.

При анализе эмпирических данных, хранящихся в КИС (рисунок 7), было установлено, что одним из путей снижения себестоимости продукции является такое распределение производства продукции между цехами, чтобы удельная стоимость сырья и энергии была минимальной. В качестве исходных данных

имитационной модели использовались данные о выпуске продукции при различной загрузке цехов, а в качестве ограничений служило общее количество продукции, которое необходимо было произвести за определенный период, а также максимальный и минимальный выпуск продукции для каждого цеха.

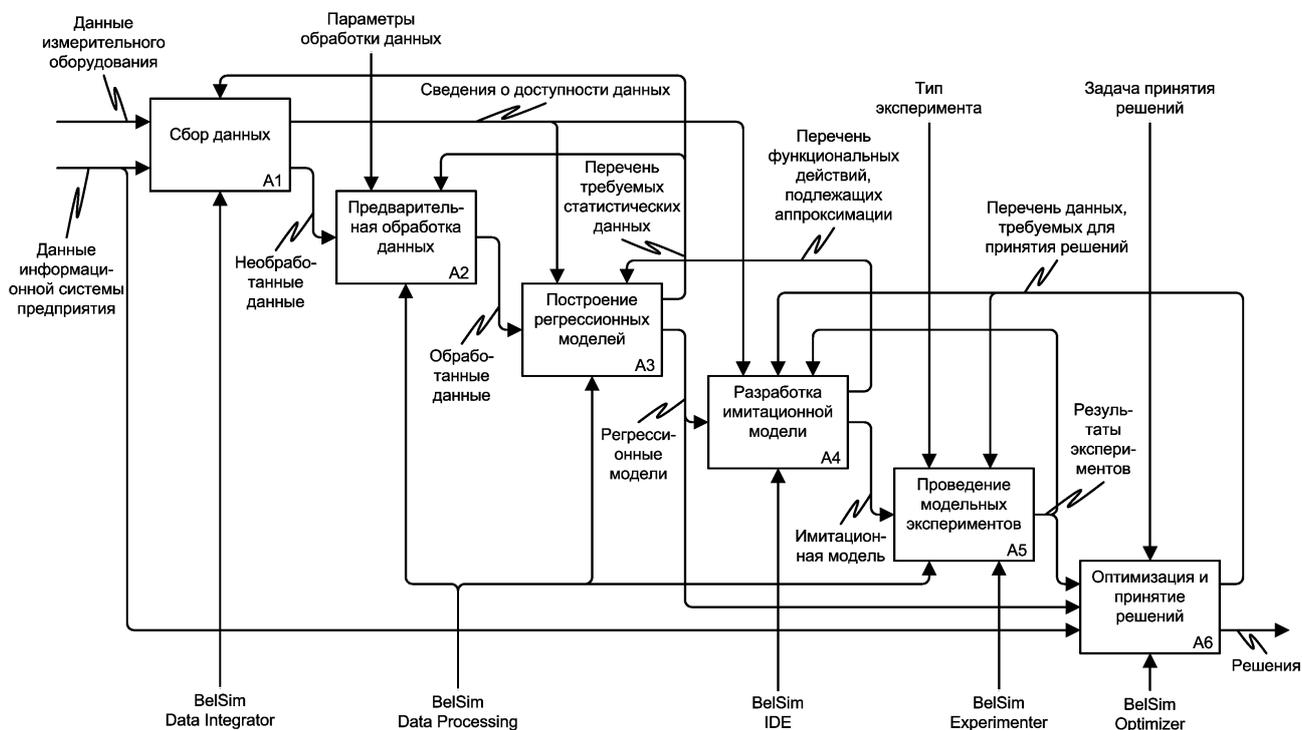


Рисунок 7 – Взаимодействие компонентов программно-технологического комплекса имитации сложных систем BelSim

Для решения задачи оптимизации производственной нагрузки в среде ПТКИ BelSim разработан специальный программный комплекс, удобный для использования самими специалистами предприятия (рисунок 8).

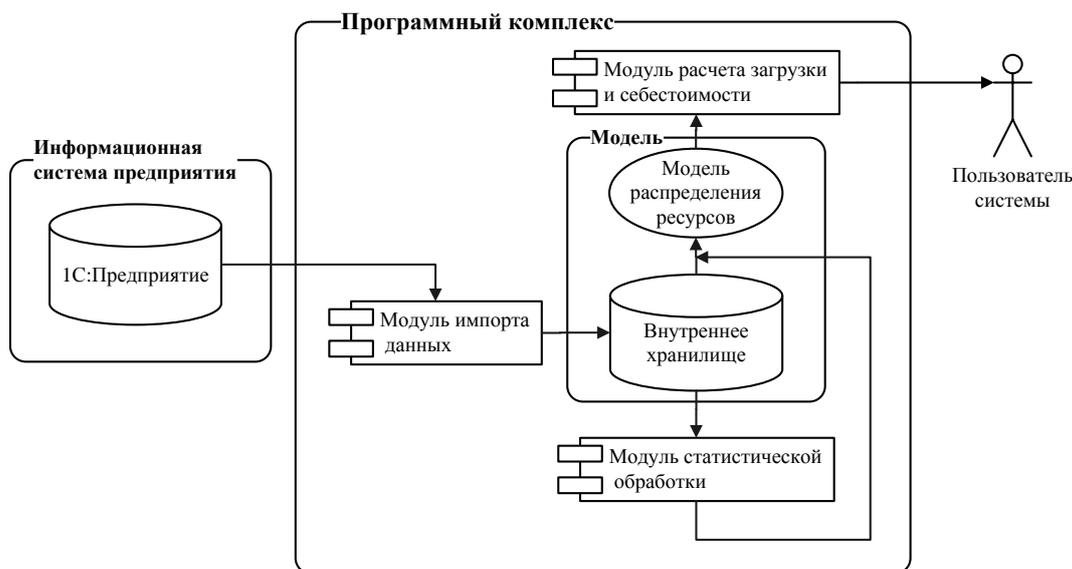


Рисунок 8 – Эксплуатация имитационной модели распределения ресурсов

В результате применения разработанного алгоритма планирования процесса производства диметилтерефталата годовой экономический эффект составил 100 млн белор. р. в ценах 2005г. за счет снижения удельных затрат в себестоимости выпускаемой продукции.

ПТКИ BelSim позволяет моделировать задачи не только для проблем промышленного предприятия, но и для смежных предметных областей. Например, для решения задачи оптимизации грузоперевозок на автотранспортном предприятии в среде ПТКИ BelSim использовалась реализация генетического алгоритма, что позволило значительно сократить пространство решений за счет исключения недопустимых вариантов грузоперевозок. Задача о грузоперевозках использовалась также для количественной оценки эффективности распределенных вычислений в вычислительной сети, что показало сокращение времени имитационных экспериментов в 1,9 – 2,5 раза.

На самом верхнем уровне системы управления предприятием ОАО «Могилевхимволокно» (Республика Беларусь) рассматриваются вопросы распределения ресурсов и взаимовлияние между подсистемами с точки зрения всей системы в целом и вопрос об эффективности и допустимости ее режимов. Наиболее детально при моделировании рассматриваются только те подсистемы, в которых имеется существенное снижение степени эффективности и допустимости режимов. *Выбор типа координации процесса планирования производственной программы* позволяет выбрать оптимальную стратегию управления промышленным производством. Модель с жесткой координацией основана на том, что производство продукции в определенном временном интервале зависит от объема заказов, поступающих из системы управления на уровне объединения. Однако производственная нагрузка не может быть больше граничного значения $ВП_{max_i}$ и не может быть ниже минимального значения $ВП_{min_i}$ из-за особенностей технологического процесса производства. При этом продукция производится непрерывно, загружается в тару и перемещается на склад.

Модель с интегральной координацией основана на постоянной производственной нагрузке, когда за определенный длительный период времени требуется выпустить заданное количество продукции. Если спрос на продукцию отсутствует, она поступает на склад. С другой стороны, при отсутствии сырья и материалов, требуется брать кредиты для их закупки. Финансовые средства могут отсутствовать, когда продукция не реализуется. При этом следует определить максимально допустимые цены на закупку сырья и материалов с учетом складских затрат на хранение товарной продукции.

Задача планирования выпуска продукции на уровне производственного цеха ОАО «Обувь» заключается в составлении графика выпуска продукции, в

котором для каждого вида продукции A_i указывается объем V_i и дата выпуска $ProdDate_i$. Для начала выпуска продукции A_i должны быть в наличии все комплектующие и материалы PC_i в соответствии с объемом V_i . График производства продукции должен быть составлен так, чтобы максимально загрузить производственные мощности $\sum_i ProdCap_i \rightarrow \max$ и выполнить к заданному сроку $SaleDate_i$ наибольшее количество заказов ($ProdDate_i \leq SaleDate_i$) при минимальных затратах в производстве продукции (например, благодаря сокращению числа переналадок оборудования при смене типа продукции). В случае, если в одном производственном цехе размещено несколько технологических линий, выпускающих однородные изделия, либо в структуре предприятия имеются цеха с выпуском одинаковой продукции, но с разными затратами или ограничениями на производство единицы продукции, актуальной становится задача планирования производственной программы для минимизации себестоимости продукции. Базовая имитационная модель для решения задачи оптимизации планирования реализована в программном комплексе ShagoVitaPro для поддержки принятия решений в обувном производстве ОАО «Обувь».

В программном комплексе ShagoVitaPro блок ввода данных модели Model Data Designer предоставляет пользователю удобный и интуитивно понятный графический интерфейс, позволяет сохранять данные модели в виде двоичного файла с расширением SVT, а также в виде XML-файла. Исполняемый файл базовой имитационной модели производственно-экономической деятельности предприятия (ПЭДП) использует подсистему для планирования и проведения имитационных экспериментов BelSim Experimenter по определенному сценарию (плану) на основе исходных данных, заданных пользователем. Программный модуль обработки и анализа результатов моделирования (экспериментов) Output Data Analyser и подсистема для планирования и проведения имитационных экспериментов BelSim Experimenter являются компонентами программного модуля Model Data Designer, что позволяет пользователю оперативно выполнить итерационный процесс подготовки данных модели, проведение имитационного эксперимента, обработку и анализ результатов.

Программный комплекс ShagoVitaPro был разработан при финансовой поддержке ОАО «Обувь» (г. Могилев, Республика Беларусь) в соответствии с договором ХД0877 и принят в опытную эксплуатацию.

Задача планирования производства в ООО «СМИТ-Ярцево» г. Ярцево, Смоленской области, Российской Федерации имеет ряд особенностей и ограничений. Например, для изготовления ПИ-трубы установлены две технологические линии с разной производительностью и временным ресурсом, ограни-

чивающим их использование в течение рабочего дня. Первая технологическая линия производит ПИ-трубы с диаметром от 25 мм до 133 мм. Вторая линия производит ПИ-трубы с диаметром от 25 мм до 133 мм и выше. Известной величиной является производительность технологических линий для изготовления ПИ-трубы заданного диаметра. Для неукомплектованной ПИ-трубы (на складе отсутствуют материальные ресурсы для производства) дата изготовления переносится на определенное количество рабочих дней.

Была поставлена задача: спланировать производство ПИ-труб по технологическим линиям для минимизации простоев, вызванных переналадками оборудования при переходе от изготовления ПИ-трубы с одним диаметром на ПИ-трубу с другим диаметром. Ограничением решения задачи является необходимость производства ПИ-труб в определенной последовательности с учетом поставки продукции заказчику на дату, предусмотренную контрактом.

В результате доопределения базовой имитационной модели алгоритмом планирования программы производства, учитывающим особенности и ограничения производства ООО «СМИТ-Ярцево», и ее эксплуатации в корпоративной информационной системе получен значительный экономический эффект. Внедрение разработанных программных средств и алгоритмов в ООО «СМИТ-Ярцево» позволило получить годовой экономический эффект в сумме 3 954 080 руб. в 2011 году за счет сокращения неукомплектованных к моменту запуска в производство изделий на 50% и сокращения заказов, не выполненных в срок, на 80%.

Целью процесса управления в КИС ОАО «Моготекс» является производство готовых тканей и трикотажных полотен в соответствии с планом производства, соответствующих определенным требованиям и удовлетворяющих требованиям потребителей. Одной из стадий изготовления готовой ткани является производственный процесс крашения тканей набивным способом (ПП КТНС). Входными ресурсами производственного процесса являются: суровые ткани и трикотажные полотна с соответствующей сопроводительной документацией; химикаты и красители, прошедшие входной контроль; вода; электроэнергия; пар; газ. Себестоимости отдельных технологических режимов складываются из стоимостей используемых ресурсов: химикатов, красителей, энергоресурсов (пара, газа, электроэнергии), зарплаты рабочих и др.

Математическая модель ПП КТНС представлена в виде взвешенного ориентированного ациклического графа, вершинами которого являются технологические режимы. Нагрузки (стоимости ресурсов, временные затраты) на дуги графа, в общем случае стохастического характера, могут быть уточнены мето-

дом Монте-Карло с использованием специально разработанных имитационных моделей и/или путем статистического анализа данных ПП КТНС (рисунок 9).

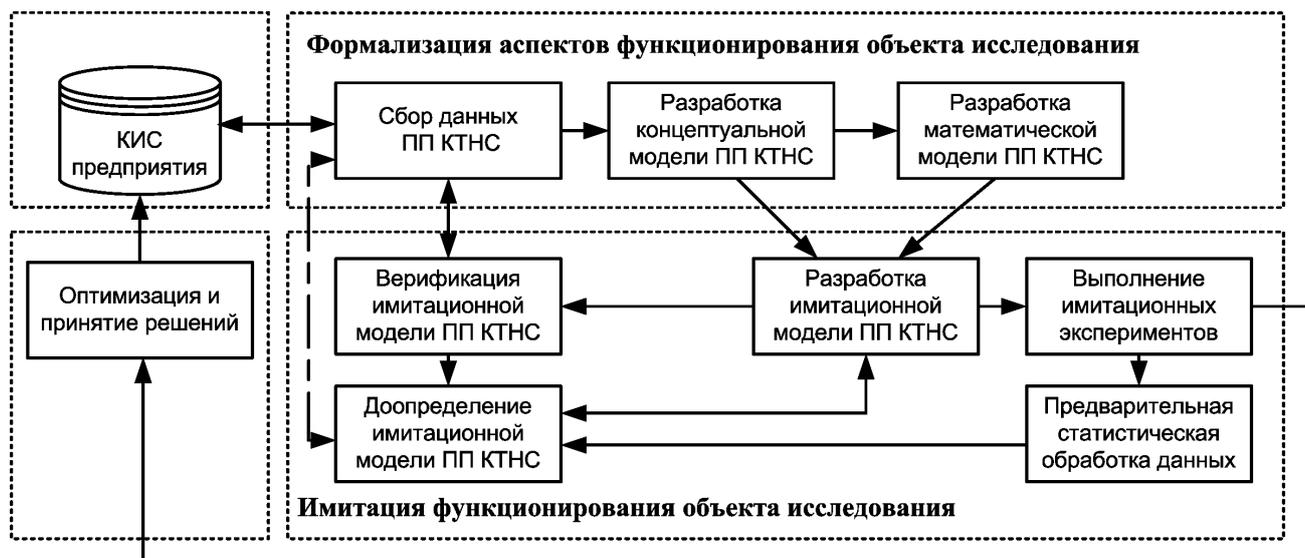


Рисунок 9 – Схема разработки и эксплуатации имитационной модели производственного процесса ОАО «Моготекс»

Для устранения неоднозначности выбора технологических режимов на каждом из этапов ПП КТНС поставлена задача многокритериальной оптимизации с использованием принципа оптимальности Беллмана с лексикографическим упорядочением критериев оптимизации (по стоимости ресурсов и/или временных затрат для выпуска определенного количества продукции).

Для поиска путей оптимизации распределения ресурсов в ПП КТНС построена имитационная модель (ИМ) в среде PowerSim, определены критерии оптимизации и управляющие параметры ИМ, разработан программный комплекс, интегрированный в КИС предприятия. Используются следующие программные и информационные средства: табличный процессор MS Excel, пакет математического моделирования PowerSim, программно-технологический комплекс имитации (ПТКИ) сложных систем BelSim, статистический пакет Statistica).

Алгоритм работы программного комплекса, использующего ПТКИ BelSim: 1) Выгрузка необходимых данных из источников КИС предприятия в MS Excel; 2) Инициализация параметров ИМ в PowerSim; запуск имитационного эксперимента; 3) Выгрузка результатов моделирования из PowerSim в MS Excel; 4), 6) Передача данных для анализа из MS Excel в ПТКИ BelSim либо в пакет Statistica; 5), 7) Выгрузка результатов анализа данных в MS Excel; 8) Сохранение полученных результатов в СУБД КИС предприятия.

В результате разработки и применения имитационной модели, метода многокритериальной оптимизации и программного комплекса получены опти-

мальные сочетания режимов производственного процесса с реальным экономическим эффектом. При использовании методики решения задачи определения последовательности оптимальных управлений и состояний производственного процесса способом пошаговой оптимизации на примере данных ОАО «Моготекс» экономический эффект от оптимизации (при производстве 1000 метров погонных тканей) в ценах 2012-го года составил порядка 684 тыс. белор. р. (14%), сокращение времени на 0,64 час (9%), соответственно для стоимостных и временных затрат.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Разработаны теоретические положения технологии имитационного моделирования и принятия решений в информационных системах управления промышленного предприятия, основанные на представлении информационной системы в виде многоуровневой иерархической социально-экономической системы и введении понятия ресурсов f - и p -типа, решении многокритериальной оптимизационной задачи управления проектированием имитационных моделей внутрифирменного управления предприятием, *отличающихся* комплексным применением информационных технологий корпоративной информационной системы, что в совокупности является существенным научным достижением в теории управления социально-экономическими системами и имеет важное социально-экономическое и хозяйственное значение для повышения эффективности управления производственными фирмами.

2. Предложен метод построения имитационных моделей (ИМ), основанный на процессном способе моделирования системы управления ресурсами промышленного предприятия, отличающийся использованием комплекса взаимосвязанных имитационных моделей с высоким уровнем детализации, включает *новые подходы* к составлению *вербальной и концептуальной модели* процессов функционирования промышленного предприятия на основе IDEF0-концепции; что обеспечивает построение модели *процесса* управления ресурсами предприятия в сокращенные сроки.

3. Исследован метод решения задачи многокритериального управления построением имитационных моделей системы управления промышленного предприятия с использованием комплекса информационных технологий и ресурсов f - и p -типа (трудовых ресурсов и программных средств), основанный на использовании принципа оптимальности Беллмана, обеспечивающий эффективное использование материальных, финансовых и трудовых ресурсов предприятия с корпоративной информационной системой.

4. Разработан метод поиска рациональных решений по распределению финансовых, материальных и трудовых ресурсов промышленного предприятия, основанный на имитации системы управления ресурсами с помощью базовой имитационной модели, *отличающийся* использованием постулата совместности координирующих решений и специальной процедуры адаптации модели алгоритма случайного поиска оптимума целевой функции с применением кластерного анализа для определения наилучшего решения в системе распределения ресурсов.

5. Предложен алгоритм количественной оценки эффективности координирующих решений в системе управления промышленного предприятия, основанный на использовании базовой имитационной модели, постулата совместности координирующих решений и применении аксиоматического принципа Парето.

6. Исследован программно-технологический комплекс имитации сложных систем (ПТКИ) BelSim с открытой архитектурой для автоматизации задач проектного моделирования процессов управления предприятиями, использующими корпоративную информационную систему, и программное средство реализации метода поиска рациональных решений BelSim Optimizer, реализованное в среде ПТКИ BelSim.

7. Адекватность базовой имитационной модели проверена при исследовании бизнес-процессов КИС в ОАО «Обувь» (Республика Беларусь, г. Могилев); исследование имитационной модели производственного процесса выполнено в ОАО «Могилевхимволокно» (Республика Беларусь) с получением годового экономического эффекта 100 млн белор. р. в ценах 2005 г. за счет снижения удельных затрат в себестоимости выпускаемой продукции; внедрение разработанных программных средств и алгоритмов в ООО «СМИТ-Ярцево» (г. Ярцево, Смоленская обл., Российская Федерация) позволило получить годовой экономический эффект в сумме около 4 млн рос. р. в ценах 2011 г.; методика решения задачи определения последовательности оптимальных управлений и состояний производственного процесса способом пошаговой оптимизации апробирована на примере данных ОАО «Моготекс» (Республика Беларусь, г. Могилев) со значительным экономическим эффектом.

8. Теоретические основы и практическая реализация результатов исследования (имитационные модели, программные продукты, технологии их использования и исследования) используются в процессе обучения специалистов в области внутрифирменного управления, системного анализа и имитационного моделирования сложных систем (Белорусско-Российский университет, Белорусский национальный технический университет).

СПИСОК ОСНОВНЫХ ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в журналах по перечню ВАК Российской Федерации

1. **Якимов, А. И.** Информационное обеспечение прогнозирования эффективности контрактов на предприятиях текстильной промышленности / А. И. Якимов, С. А. Альховик, А. И. Степанов // *Текстильная промышленность*. – 2002. – № 9. – С. 34–35.
2. **Якимов, А. И.** Автоматизация эксперимента на примере исследования генетического алгоритма / А. И. Якимов, В. В. Башаримов, С. А. Альховик // *Автоматизация и современные технологии*. – 2006. – № 5. – С. 3–9.
3. **Ковалевич, А. А.** Исследование стохастических алгоритмов оптимизации для применения в имитационном моделировании систем / А. А. Ковалевич, А. И. Якимов, Д. М. Албкеират // *Информационные технологии*. – 2011. – №8. – С. 55–60.
4. **Борчик, Е. М.** Построение плотностей распределения Пирсона для многомодальных выборок с применением кластеризации / Е. М. Борчик, А. И. Якимов, А. И. Степанов, В. В. Башаримов // *Информационные технологии*. – 2012. – № 12. – С. 30–35.
5. **Якимов, Е. А.** Сингулярный спектральный анализ последовательностей данных на этапе эксплуатации имитационной модели / Е. А. Якимов, О. М. Демиденко, А. И. Якимов // *Вестник Брянского государственного технического университета*. – 2013. – № 1 (37). – С. 95–101.
6. **Якимов, Е. А.** Построение модели числовых данных методом сингулярного спектрального анализа в имитационном моделировании / Е. А. Якимов, Е. М. Борчик, А. И. Якимов // *Вестник Иркутского государственного технического университета*. – 2013. – № 2 (73). – С. 45–51.
7. **Якимов, А. И.** Информационная оценка программных средств для управления экономической деятельностью промышленного предприятия на основе имитационной модели / А. И. Якимов, К. В. Захарченков // *Вестник Брянского государственного технического университета*. – 2014. – № 1(41). – С. 94–101.
8. **Якимов, А. И.** Математическое и программное обеспечение для поддержки принятия решений при планировании производства продукции на промышленном предприятии / А. И. Якимов, К. В. Захарченков // *Современные проблемы науки и образования*. – 2014. – № 2. – URL: <http://www.science-education.ru/116-12770> (дата обращения: 16.04.2014).

9. **Аверченков, В. И.** Многокритериальное управление технологическим процессом с использованием принципа оптимальности Беллмана / В. И. Аверченков, А. И. Якимов, Е. М. Борчик // Известия Волгоградского государственного технического университета. – 2014. – Т. 22. – № 25(152). – С. 95–101.

10. **Якимов, А. И.** Анализ методов построения имитационных моделей корпоративных информационных систем / А. И. Якимов, О. М. Демиденко, Н. Н. Ивкина // Информационные системы и технологии. – 2016. – № 2(94). – С. 40–50.

11. **Аверченков, В. И.** Концепция оценки эффективности процессов управления в корпоративных информационных системах предприятий / В. И. Аверченков, С. К. Крутолевич, А. И. Якимов, К. В. Захарченков // Вестник Брянского государственного технического университета. – 2016. – № 1 (49). – С. 113–119.

12. **Якимов, А. И.** Оптимизационная задача управления построением имитационной модели в корпоративной информационной системе / А. И. Якимов, Е. А. Якимов, В. И. Аверченков, Н. Н. Ивкина // Вестник Брянского государственного технического университета. – 2016. – № 2 (50). – С. 207–214.

13. **Аверченков, В. И.** Структура программно-технологического комплекса имитации в корпоративной информационной системе предприятия / В. И. Аверченков, А. И. Якимов // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В. Г. Шухова. – 2016. – № 6. – С. 176–182.

14. **Аверченков, В. И.** Обработка многомерных данных несколькими методами кластерного анализа / В. И. Аверченков, А. И. Якимов, Е. М. Борчик, В. В. Башаримов // Вестник Воронежского государственного технического университета, серия: Системный анализ и информационные технологии. – 2016. – № 1. – С. 110–119.

15. **Якимов, А. И.** Кластеризация состояний объекта при решении задачи выбора оптимальных технологических режимов / А. И. Якимов, Е. М. Борчик, Е. М. Максимов // Информационные технологии и вычислительные системы. – 2016. – № 4. – С. 33–43.

Монографии

16. **Якимов, А. И.** Имитационное моделирование в ERP-системах управления / А. И. Якимов, С. А. Альховик. – Минск: Беларус. наука, 2005. – 197 с. : ил.

17. **Якимов, А. И.** Технология имитационного моделирования систем управления промышленных предприятий : монография / А. И. Якимов. – Могилев: Беларус.-Рос. ун-т, 2010. – 304 с.: ил.

Статьи в других научных изданиях, в том числе за рубежом

18. **Якимов, А. И.** Модернизация программно-технологического комплекса имитации сложных систем BelSim для организации распределенных вычислений / А. И. Якимов // Информатика. – 2008. – № 2(18). – С. 137–142.

19. **Якимов, А. И.** Программное обеспечение интеграции имитационной модели с комплексной информационной системой / А. И. Якимов, К. В. Захарченков // Доклады БГУИР. – 2008. – № 2(32). – С. 111–117.

20. **Якимов, А. И.** Определение классов целевых функций методами кластерного анализа / А. И. Якимов, Е. М. Борчик, В. В. Башаримов // Веснік Гродзенскага дзяржаўнага ўніверсітэта імя Янкі Купалы. – 2012. – № 1(126). – С. 80–89.

21. **Якимов, А. И.** Метод имитационного моделирования многоуровневых иерархических систем / А. И. Якимов // Электронное моделирование. – 2008. – № 5. – С. 69–80.

22. **Якимов, А. И.** Выбор стратегии межуровневой координации в сложной производственно-экономической системе на основе имитационного моделирования / А. И. Якимов, С. А. Альховик // Интеллектуальные системы (AIS'06) и Интеллектуальные САПР (CAD'06): тр. междунар. науч.-техн. конф. в 3 т., Дивноморск (Россия), 3–10 сент. 2006 г. – М. : Физматлит, 2006 – Т. 2. – С. 239–245.

23. **Якимов, А. И.** Конструирование интегральной целевой функции производственно-экономической деятельности предприятия / А. И. Якимов // Инфраструктурное обеспечение бизнес-процессов в региональных социально-экономических системах: материалы Всерос. науч.-практ. конф.; Кострома, 15 – 16 апреля 2016 г. – Кострома: КГУ им. Н. А. Некрасова, 2016. – С. 92–96.

24. **Якимов, А. И.** Статистический анализ в программно-технологическом комплексе имитации производственно-экономических систем / А. И. Якимов // Математические методы в технике и технологиях – ММТТ-29: сб. трудов XXIX Междунар. науч. конф.; Санкт-Петербург, 31 мая – 3 июня 2016 г.: в 12 т. Т.3. / под общ. ред. А.А. Большакова. – Саратов: Саратов. гос. техн. ун-т; Санкт-Петербург: СПбГТИ(ТУ), СПбПУ, СПИИРАН; Самара: Самарск. гос. техн. ун-т, 2016.– С. 91–93.

25. Hierachical mathematics: theory of sway / S. Novikava, S. Gancharova, A. Burawkin, M. Mahoniok, W. Nowik, A. Yakimaw, K. Miatliuk // Proceedings of 8th IFAC / IFORS / IMACS / IFIP Symposium on Large Scale Systems: Theory and Applications, LSS'98., Rio Patras (Greece), July 15–17, 1998. – Rio Patras: University of Patras, 1998. – pp. 480–487.

26. **Yakimov, A. I.** Computer Data Analysis in Modeling and Optimization of Manufacturing Process Control System / A. I. Yakimov, S. A. Alkhovik // Computer

Data Analysis and Modeling : Complex Stochastic Data and Systems : Proc. of the Eighth Intern. Conf., Minsk, Sept. 11-15, 2007: in 2 vol. – Minsk : Publ. center BSU, 2007. – Vol 2. – pp. 204–207.

Публикации в изданиях, индексируемых в базе данных Scopus

27. **Averchenkov, V.** Hierarchical Deep Learning: A Promising Technique for Opinion Monitoring and Sentiment Analysis in Russian-Language Social Networks / V. Averchenkov, D. Budylskii, A. Podvesovskiy, A. Averchenkov, M. Rytov, A. Yakimov // Proceedings of the First Conference, CIT&DS 2015: Creativity in intellectual technologies & data science. Volgograd, Russia, September 15 – 17, 2015. – Springer International Publishing, Switzerland. – 2015. – pp. 583–592.

Свидетельства о регистрации компьютерных программ

28. **Якимов, А. И.** Программно-технологический комплекс имитации сложных систем «BelSim 2» : свидетельство о регистрации компьютерной программы № 025 / А. И. Якимов, С. А. Альховик, В. В. Башаримов, К. В. Захарченков. – Минск: НЦИС, 2008. – Заявка № С20080010. – Дата подачи: 04.04.2008.

29. **Альховик, С. А.** Программный комплекс оценки эффективности контрактов «Contract Analyzer 2» : свидетельство о регистрации компьютерной программы № 026 / С. А. Альховик, А. И. Якимов. – Минск: НЦИС, 2008. – Заявка № С20080011. – Дата подачи: 04.04.2008.

30. **Якимов, А. И.** Программный комплекс имитации производственно-экономической деятельности «ShagoVitaPro» : свидетельство о регистрации компьютерной программы № 308 / А. И. Якимов, К. В. Захарченков, С. А. Альховик, И. А. Емельянов, И. И. Мельников. – Минск: НЦИС, 2011. – Заявка № С20110027. – Дата подачи: 14.04.2011.

31. **Якимов, Е. А.** Программный модуль анализа сингулярного спектра числовых последовательностей данных «BelSim2#.SSA» : свидетельство о регистрации компьютерной программы № 518 / Е. А. Якимов, Д. М. Албкеират, Н. М. Чапаров, А. И. Якимов. – Минск: НЦИС, 2013. – Заявка № С20130042. – Дата подачи: 23.05.2013.

Подписано в печать «___» _____ 2017. Формат 60x84 1/16. Бумага офсетная.

Офсетная печать. Печ. л. 2,0 Тираж 100 экз. Заказ _____.

Брянский государственный технический университет,

241035, г. Брянск, бульвар 50 лет Октября, 7.

Лаборатория оперативной полиграфии БГТУ, ул. Институтская, 16.