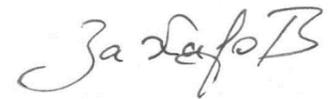


На правах рукописи



Захаров Валерий Вячеславович

**МОДЕЛИ И АЛГОРИТМЫ ПЛАНИРОВАНИЯ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ
И МОДЕРНИЗАЦИИ КОРПОРАТИВНОЙ ИНФОРМАЦИОННОЙ
СИСТЕМЫ НА ОСНОВЕ СЕРВИС-ОРИЕНТИРОВАННОГО ПОДХОДА**

Специальность: 05.13.01 – Системный анализ, управление
и обработка информации (технические системы)

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Санкт-Петербург
2021

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки «Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр Российской академии наук» (СПб ФИЦ РАН) в лаборатории информационных технологий в системном анализе и моделировании.

Научный руководитель: **Соколов Борис Владимирович**, доктор технических наук, профессор, Заслуженный деятель науки РФ, главный научный сотрудник, руководитель лаборатории информационных технологий в системном анализе и моделировании СПИИРАН (СПб ФИЦ РАН).

Официальные оппоненты: **Басыров Александр Геннадьевич**, доктор технических наук, профессор, начальник кафедры информационно-вычислительных систем и технологий программирования ФГБВОУ «Военно-космическая академия им. А.Ф. Можайского» МО РФ.

Дубенецкий Владислав Алексеевич, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры информационных систем ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)».

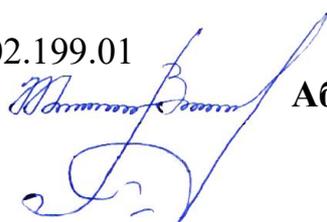
Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова».

Защита диссертации состоится «27» мая 2021 г. в 14 часов 00 минут на заседании диссертационного совета Д.002.199.01, созданного на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр Российской академии наук» по адресу: 199178, Санкт-Петербург, 14 линия В.О., 39.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Учреждения Российской академии наук Санкт-Петербургского института информатики и автоматизации РАН по адресу: 199178, Санкт-Петербург, 14-а линия В.О., 39 и на сайте <http://www.spiiras.nw.ru/dissovet>

Автореферат разослан «___» _____ 2021 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 002.199.01
кандидат технических наук



Абрамов Максим Викторович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. В настоящее время происходит широкомасштабное внедрение и использование информационных технологий в системах управления критическими инфраструктурами, в гибких автоматизированных производствах, в киберфизических системах, каждую из которых принято относить к классу сложных технических объектов (СТО). Анализ содержания негативных тенденций, связанных с противоречием между уровнем и масштабами общественного производства и качеством управления этим производством показал, они в наиболее яркой форме проявляются в области создания и использования корпоративных информационных систем (КИС).

Современная КИС – это информационная система, в которой в автоматизированном режиме решается значительная часть как целевых, так и обеспечивающих и вспомогательных задач, определяющих основные виды деятельности СТО, в состав которого входит рассматриваемая система. Комплекс аппаратно-программных средств, составляющих основу КИС, предоставляет (формирует и реализует) *информационные услуги (сервисы)* бизнес-процессам (БП). При этом объективно основные элементы и подсистемы КИС подвержены физическому и моральному старению, что приводит к необходимости проведения их планомерного обновления или, другими словами, модернизации.

При проведении данного вида работ необходимо учитывать высокую и сложную структурную динамику пространственно-временных, технологических, технических и организационных ограничений рассматриваемых объектов и систем. Вместе с тем переход от «старого» (существующего) варианта КИС к «новому» (модернизированному) варианту КИС не может быть проведен мгновенно. Это на практике это приводит к тому, что на достаточно длительном интервале времени (периоде модернизации КИС) происходит совместная эксплуатация элементов и подсистем существующей и «новой» КИС. Важно, что в этих условиях, показатели качества и эффективности (БП), поддерживаемых данными КИС, не должны ухудшаться. Для этого требуется, прежде всего, осуществлять постоянное согласование (координацию) процессов функционирования и модернизации КИС. В этих условиях **особую актуальность и значимость** приобретает постановка и решение новой *научно-технической задачи* разработки специального модельно-алгоритмического обеспечения комплексного планирования функционирования и модернизации КИС.

Степень разработанности темы. Состояние исследований, посвященных решению научно-технических задач комплексного планирования функционирования и модернизации КИС, указывает на то, что сегодня имеется потребность в развитии методических и методологических основ управления СТО (к которым относятся рассматриваемые КИС) на основе имитационного, экспертного, ситуационного, мультиагентного и комплексного моделирования, а также методов искусственного интеллекта и многокритериальной поддержки управленческих решений (Б.Я. Советов, 1985, С.В. Микони, 2018, Д.А. Поспелов, 1968, В.И. Городецкий, 2001). К настоящему времени также разработан ряд моделей, методов и алгоритмов оперативного и календарного планирования, равно как и диспетчеризации гетерогенных операций в СТО (В.С. Танаев, В.С. Шкурба, 1975; И.Н. Зимин, Ю.П. Иванилов, А.Я. Лернер, 1971; Н.Н. Моисеев, 1975; Б.В. Соколов, 2018; С.А. Потрясаев, 2020).

Анализ результатов, полученных зарубежными и отечественными учеными, показал, что они содержат теоретические и практические разработки, охватывающие основополагающие аспекты исследуемой предметной области, однако, в сущности, они нацелены на *изолированное решение* задач планирования функционирования и модернизации отдельных элементов и подсистем КИС, а также их *фрагментарное согласование*. Указанный пробел традиционно объясняется большой размерностью рассматриваемых задач, наличием структурной динамики КИС, а также сложностью получения строгого аналитического решения. Это в конечном итоге приводит к использованию эвристических методов и алгоритмов, которые не могут обеспечить *требуемый уровень качества разрабатываемых комплексных планов функционирования и модернизации КИС из-за того, что возникают значительные методические трудности определения эталонных (оптимальных) решений и их сравнения с полученными эвристическими планами*.

В диссертации показано, что задача разработки комплексных планов функционирования и модернизации с формальной точки зрения может быть сведена к решению взаимосвязанных динамических задач многокритериального структурно-функционального синтеза облика КИС и поиска программы перевода данной информационной системы из заданного в требуемое состояние. При такой динамической интерпретации синтезируемые комплексные планы представляют собой программы управления сложным динамическим объектом, в качестве которого в диссертации рассматривается КИС. Указанное направление исследований описано в публикациях В.Н. Калинина, Б.А. Резникова, Е.И. Варакина, И.Н. Зимина и Ю.П. Иванилова, Дж. Клира, В.И. Скурихина, Р.М. Юсупова, Б.В. Соколова, М.Ю. Охтилева, Е.Г. Цивирко и в наибольшей степени соответствует решаемой в диссертации научно-технической задаче.

Цель диссертационного исследования состоит в повышении *оперативности, обоснованности и качества* управления КИС на основе разработки и исследования моделей и алгоритмов комплексного планирования функционирования и модернизации ее основных элементов и подсистем.

В диссертации решены новые научно-технические задачи: полимодельного описания рассматриваемой предметной области; разработки алгоритма синтеза комплексных планов функционирования и модернизации КИС; разработки методики оценивания качества комплексных планов функционирования и модернизации КИС.

Объект исследования: КИС, предоставляющая информационные сервисы СТО.

Предмет исследования: разрабатываемое специальное модельно-алгоритмическое обеспечение решения задач многокритериального синтеза комплексных планов функционирования и модернизации КИС на основе функционально-стоимостного и сервис-ориентированного подходов.

Научная новизна полученных в диссертации результатов состоит в следующем:

1. Разработан комплекс логико-динамических моделей программного управления разномасштабными взаимосвязанными операциями и гетерогенными ресурсами КИС на основе функционально-стоимостного и сервис-ориентированного подходов. Достоинство, новизна и отличия разработанного полимодельного комплекса заключаются в том, что предложенные модели программного управления (планирования) информационными сервисами, позволяют связать стоимостные показатели качества, оценивающие в обобщенной форме затраты на реализацию БП (выполняемых в рамках соответствующих СТО), с показателями, характеризующими объем услуг, предоставляемым данными сервисами, а также провести расчет расходов

различных видов ресурсов, связанных с эксплуатацией и модернизацией КИС. При таком подходе отсутствуют методические ошибки в результатах решения задач планирования по сравнению с традиционными подходами, в рамках которых проводится независимое решение задач оптимизации программ функционирования и программ модернизации КИС на основе той или иной эвристической декомпозиции.

2. Предложен комбинированный алгоритм комплексного планирования функционирования и модернизации КИС, используя который, удалось дискретно-событийную задачу комплексного планирования операций и распределения ресурсов преобразовать в динамическую двухточечную краевую задачу с помощью метода локальных сечений Болтянского В.Г. При этом за счет предложенного нелинейного преобразования исходных технических и технологических ограничений, описывающих исследуемую предметную область, удается, оставаясь в классе кусочно-непрерывных управляющих воздействий, получать во времени их целочисленные значения, определяющие конкретный оптимальный порядок выполнения разномасштабных взаимосвязанных операций и распределения разнотипных ресурсов КИС в процессе ее функционирования и модернизации.

3. Разработана методика динамического многокритериального оценивания качества комплексных планов функционирования и модернизации КИС. При этом в отличие от существующих подходов, основанных на тех или иных методиках прямого эвристического назначения весовых коэффициентов в свертке частных показателей качества, в рамках предложенной методики удалось данные коэффициенты сформировать автоматически на основе предварительной обработки и анализа знаний экспертов об исследуемой предметной области, задаваемых в нечетко-продукционном виде и обрабатываемых методами теории планирования экспериментов, а также путем соответствующих дополнительных преобразований разработанных логико-динамических моделей планирования.

Теоретическая значимость полученных в диссертации результатов, состоит, во-первых, в разработке моделей, методов и алгоритмов оптимизации решения задач синтеза комплексных планов (программ) функционирования и модернизации КИС, обеспечивающих повышение ее производительности на заданном этапе жизненного цикла, и, во-вторых, в эффективной реализации созданного специального модельно-алгоритмического обеспечения в различных предметных областях, что подтвердило научную обоснованность и правильность путей решения научно-технической задачи, поставленной в диссертации.

Практическая значимость состоит в повышении оперативности, обоснованности и в целом качества разрабатываемых комплексных планов функционирования и модернизации КИС. Этого удалось достичь за счет декомпозиции структур, составляющих СТО, на основе принципов сервис-ориентированного и функционально-стоимостного подходов, а также современных фундаментальных теоретических и практических результатов, полученных в теории управления структурной динамикой сложных динамических объектов. Опора на указанные подходы и теории позволила провести комплексное описание и исследование взаимосвязанных процессов функционирования и модернизации КИС на предложенном конструктивном языке описания, т.е. с помощью логико-динамических моделей программного управления как КИС, так и БП СТО. Разработанные в диссертации методические и методологические основы комплексного планирования, базирующиеся на системно-кибернетическом подходе, позволяют системно подойти к решению задач многокритериального оценивания, анализа и оптимизации экономико-

управленческих показателей качества комплексных планов функционирования и модернизации КИС, что не удавалось сделать ранее.

Полученные в диссертации результаты имеют высокое практическое значение, которое подтверждается их внедрением в различных предметных областях (космонавтика, государственное управление, промышленное производство, научная и образовательная деятельность).

Методология и методы исследования. При выполнении работы были использованы: общая теория систем; теория принятия решений; теория расписаний; методы решения экстремальных задач; методология системного анализа и современные модели, методы и алгоритмы, развиваемые в современной теории управления структурной динамикой СТО; теория многокритериального выбора; методы исследования операций.

Положения, выносимые на защиту:

1. Полимодельное логико-динамическое описание и постановка задачи комплексного планирования функционирования и модернизации КИС как задачи программного управления динамическими объектами со смешанными ограничениями.

2. Комбинированный алгоритм решения задачи комплексного планирования функционирования и модернизации КИС, построенный на основе использования методов теории оптимального управления и многокритериального выбора.

3. Методика динамического многокритериального оценивания качества комплексных планов функционирования и модернизации КИС.

Достоверность и степень обоснованности научных положений, выводов и результатов подтверждается: проведенным анализом отечественных и зарубежных источников, отражающих классические подходы и современное состояние исследований задач моделирования, управления функционированием и модернизацией КИС, в т.ч. вопросов комплексной оптимизации и согласования результатов объемно-календарного и оперативного планирования в СТО; согласованностью результатов моделирования и проведенных расчетов с фактическими данными, полученными в процессе проведения работ по исследованию процессов функционирования и модернизации основных элементов и подсистем КИС в различных предметных областях, что подтвердило корректность предложенных математических методов, моделей и алгоритмов оптимизации синтезируемых комплексных планов; проведенной апробацией основных теоретических положений в трудах авторитетных печатных изданий и в докладах на российских и международных научно-практических конференциях.

Реализация и внедрение результатов работы. Результаты работы были использованы в СПИИРАН в рамках следующих проектов и НИР: государственное задание №0073-2019-0004 «Методология и технологии интеграции существующих и перспективных государственных и коммерческих информационно-управляющих и телекоммуникационных систем и сетей на различных этапах их жизненного цикла»; грант РФФИ № 18-07-01272: «Разработка теоретических и технологических основ интеллектуальной поддержки принятия решений при комплексном планировании работы городского магистрального транспорта в мегаполисе с учетом предпочтений пассажиров различных социальных групп»; грант РФФИ № 18-08-01505: «Разработка и исследование методов и алгоритмов проактивного управления восстановлением работоспособности бортовых систем сложных динамических объектов при возникновении нештатных ситуаций»; грант РФФИ 20-08-01046: «Комбинированные методы и алгоритмы комплексного моделирования, многокритериального оценивания

оптимизации показателей живучести и эффективности функционирования сложных объектов, обладающих структурно-функциональной избыточностью»; грант РФФИ №19-08-00989 А: «Разработка и исследование научных основ теории многокритериального оценивания, анализа и управления качеством моделей и полимодельных комплексов, описывающих сложные технические объекты»; грант РФФИ № 19-11-00126 «Модели и методы поддержки принятия решений на основе человеко-машинного коллективного интеллекта»; результаты исследований были использованы в рамках учебных процессов в Санкт-Петербургском государственном университете аэрокосмического приборостроения; при проведении СЧ ОКР «Разработка единого виртуального электронного паспорта КРН «Союз-2» в АО «НИО ЦИТ «Петрокомета», при проведении работ по комплексному планированию функционирования и модернизации подсистемы КИС ООО «Фацер».

Апробация работы. Основные результаты данной были апробированы на 12 конференциях, в т.ч. на 7 международных, среди которых: 32nd European Modeling & Simulation Symposium (EMSS 2020) Greece, Athens, 2020; 9th IFAC Conference on Manufacturing Modelling, Management and Control MIM 2019 Berlin, Germany, 28–30 August 2019; The 13th International Symposium on Intelligent Distributed Computing (IDC 2019); 4th International Scientific Conference “Intelligent Information Technologies for Industry” December 2-7, 2019, Ostrava-Prague, Czech Republic; Международная научная конференция «Танаевские чтения» 2018, Минск (27-30 марта 2018г.); XV Санкт-Петербургская международная конференция «Региональная информатика (РИ-2018) Санкт-Петербург, 24-26 октября 2018 г.; XVII Международная научно-практическая конференция: «Логистика: современные тенденции развития» 5 апреля 2019 г. Санкт-Петербург; 5-я Международная научно-практическая конференция «Имитационное и комплексное моделирование морской техники и морских транспортных систем» (ИКМ МТМТС-2019); 5-я Международная научной конференция «Технологическая перспектива в рамках евразийского пространства»: Новые рынки и точки экономического роста. Санкт-Петербург 7–8 ноября 2019 г.; Всероссийское совещание по проблемам управления (ВСПУ-2019, Совещание), посвященное 80-летию Института проблем управления имени В.А. Трапезникова РАН (ИПУ РАН), проводится 17-20 июня 2019 года в ИПУ РАН (г. Москва, Россия); Конференция "Информационные технологии в управлении" (ИТУ-2020), проводимая в рамках 13-й мультikonференции по проблемам управления (МКПУ-2020); V межрегиональной научно-практической конференции (Севастопольский государственный университет).

Публикации. Результаты диссертационной работы изложены в 20 научных публикациях, среди них в рецензируемых журналах из перечня ВАК одна публикация в журнале «Научное приборостроение» (2020 г.), три публикации в «Известиях ВУЗов. Приборостроение» (2019, 2020 гг.), четыре публикации в изданиях, индексируемых в Web of Science/SCOPUS.

Структура и объем диссертации. Основной текст изложен на 172 печатных листах, содержит 6 таблиц, 34 рисунка. Список цитированной литературы включает 190 наименований. Диссертационная работа состоит из введения, четырех разделов, заключения, списка литературы и 6 приложений.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении рассмотрено состояние исследований, посвященных решаемой в диссертации научно-технической задачи, обоснована актуальность темы диссертации, ее научная новизна и практическая значимость, сформулирована цель работы.

Приведены краткое содержание диссертации по главам, а также данные о внедрении и апробации результатов.

В первой главе проведен анализ состояния исследований в области разработки специального модельно-алгоритмического обеспечения решения задач комплексного планирования функционирования и модернизации КИС. Он показал, что используемые сегодня математические методы теорий расписаний и дискретной оптимизации *не позволяют* (из-за ограниченных возможностей данных теорий) с требуемой полнотой, степенью детализации и обоснованностью синтезировать комплексный план функционирования и модернизации КИС. Указанный недостаток традиционных подходов связан с объективным отсутствием возможности конструктивно учесть во времени динамику технических, технологических и организационных ограничений рассматриваемого объекта. Вопросы оценивания влияния проводимых работ на функционально-стоимостные показатели качества функционирования и модернизации КИС, а именно показатель совокупной стоимости владения (ССВ) КИС, в данном контексте, к сожалению, не рассматривались.

Далее в главе обоснована необходимость разработки нового подхода к комплексному планированию функционирования КИС на различных стадиях жизненного цикла (в т.ч. на этапе модернизации); актуализирована потребность в применении принципов, подходов, методов и алгоритмов существующей современной фундаментальной теории управления структурной динамикой СТО.

Проведено построение концептуальной модели предметной области, которая на содержательном уровне описывает процессы функционирования и модернизации КИС. В ее состав вошли концепты: «БП», «операция», «сервис», «ресурс», «структура». В качестве основы для проведения интеграции структур (технической, технологической, организационной) выбрана технологическая структура.

В главе также показано, что задача синтеза технологий и программ управления процессами комплексного функционирования и модернизации КИС может быть сформулирована как задача выработки оптимальных управляющих воздействий, переводящих рассматриваемый объект из заданного в требуемое структурное состояние, описываемое как текущее состояние объектов, входящих в заданный тип структуры, так и состояние отношений между ними. При этом в общем случае, в состав решаемых задач должны войти задачи: структурно-функционального синтеза облика модернизируемого объекта; определение срока, к которому необходимо завершить модернизацию; синтез технологий проведения модернизации; *синтез комплексного плана функционирования и модернизации КИС*; синтез управляющих воздействий, обеспечивающих реализацию плана проведения модернизации. В диссертации решается только *полностью детерминированная* задача разработки комплексного плана функционирования и модернизации КИС.

В главе предложено теоретико-множественное описание решаемой задачи, которое сводится к следующему – необходимо разработать модели, методы и алгоритмы, позволяющие находить такие значения управления и состояния существующей и «новой» КИС $\langle U^t, S_\delta^{tf} \rangle$ при которых:

$$\begin{aligned}
 & J_\theta(X_\chi^t, \Gamma_\chi^t, Z_\chi^t, F_{\langle \chi, \chi \rangle}^t, \Pi_{(\tilde{\delta}, \tilde{\delta})}^t, t \in (t_0, t_f]) \rightarrow \underset{\langle U^t, S_\delta^{tf} \rangle \in \Delta_g}{extr} ; \\
 & \Delta_g \{ \langle U^t, S_\delta^{tf} \rangle \mid R_\beta \left(X_\chi^t, \Gamma_\chi^t, Z_\chi^t, F_{\langle \chi, \chi \rangle}^t, \Pi_{(\tilde{\delta}, \tilde{\delta})}^t \right) \leq \tilde{R}_g ; \\
 & U^t = \Pi_{\langle \delta_1, \delta_2 \rangle}^{t_1} \circ \Pi_{\langle \delta_2, \delta_3 \rangle}^{t_2} \circ \dots \circ \Pi_{\langle \tilde{\delta}, \tilde{\delta} \rangle}^{t_f} ; \beta \in \mathbf{B} \},
 \end{aligned} \tag{1}$$

где J_θ – стоимостные, временные, ресурсные показатели, характеризующие качество функционирования и модернизации системы управления СТО и КИС; $\theta \in \Theta$ множество номеров показателей; χ – множество индексов, соответствующие структурам СТО; $T = (t_0, t_f]$ – интервал времени, на котором функционирует КИС и модернизируется КИС; $X_\chi^t = \{x_{\chi,l}^t, l \in L_\chi\}$ – множество элементов, входящих в состав структуры динамического альтернативного системного графа (ДАСГ) G_χ^t (множество вершин ДАСГ), с помощью которого задается управляемая структурная динамика КИС в момент времени t ; $\Gamma_\chi^t = \{\gamma_{\langle \chi, l, l' \rangle}^t, l, l' \in L_\chi\}$ – множество дуг ДАСГ типа G_χ^t , отражающих взаимосвязи между его элементами в момент времени t ; $Z_\chi^t = \{z_{\langle \chi, l, l' \rangle}^t, l, l' \in L_\chi\}$ – множество значений параметров, количественно характеризующих взаимосвязь соответствующих элементов ДАСГ; $F_{\langle \chi, \chi' \rangle}^t$ – отображения различных структур СТО и КИС друг на друга в момент времени t ; $\Pi_{\langle \tilde{\delta}, \tilde{\delta}' \rangle}^t$ – композиции структурных состояния с номерами $\tilde{\delta}, \tilde{\delta}'$ в момент времени t ; Δ_g – множество динамических альтернатив (множество структур и параметров БП, «новой» и существующей КИС, а также множество программ их функционирования); U^t – управляющие воздействия, позволяющие синтезировать структуры модернизируемой и внедряемой КИС; \tilde{R}_g – заданные величины; «o» – операция композиции отображений; \mathbf{B} – множество номеров пространственно-временных, технических и технологических ограничений, определяющих процессы реализации программ модернизации и функционирования КИС.

Отличие представленной в первой главе формальной постановки задачи комплексного планирования функционирования и модернизации КИС заключается в использовании функционально-стоимостного и сервисно-ориентированного подходов к описанию объекта диссертационного исследования (см. рисунок 1). С использованием предложенной декомпозиции удастся на конструктивном уровне провести экспертное оценивание взаимного влияния факторов, располагаемых на смежных уровнях и на этой основе транзитивно оценить их межуровневое взаимодействие, позволившее обосновать коэффициенты значимости соответствующих внешних и внутренних сервисов по отношению к БП и конкретным информационным ресурсам.

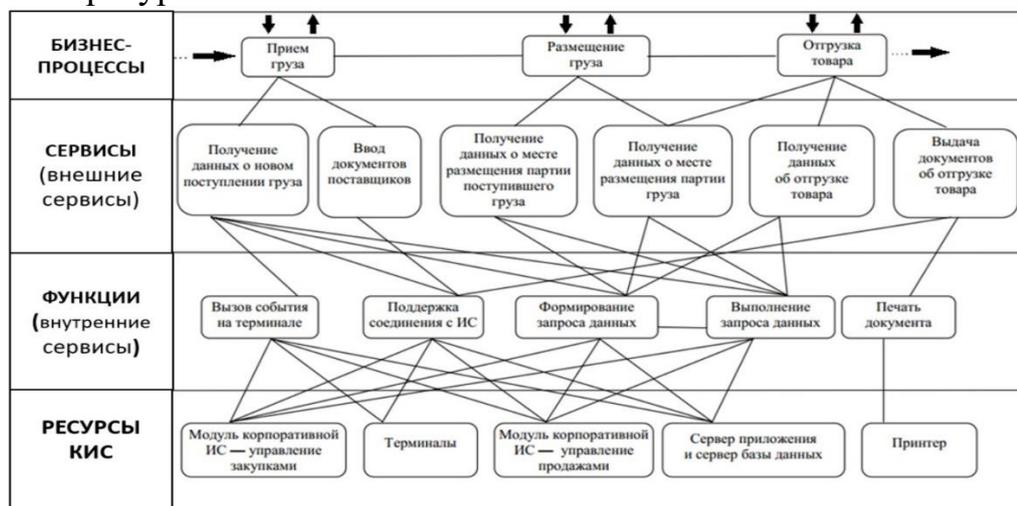


Рисунок 1. Пример возможной взаимосвязи БП, информационных сервисов и ресурсов КИС

Предложенная системно-управленческий интерпретация позволила с общих позиций рассмотреть непрерывные процессы управления изменения функций (свойств) и структур КИС на различных стратах, а также с единых методологических и методических позиций подойти к описанию большеразмерной многоуровневой системы, что не удавалось сделать ранее.

Во второй главе предложена оригинальная логико-динамическая интерпретация процессов скоординированного функционирования и модернизации КИС. Представлен комплекс логико-динамических моделей программного управления элементами и подсистемами КИС: модель программного управления БП ($M^{(1)}$), модель программного управления функционированием сервисов КИС ($M^{(2)}$), модель программного управления модернизацией ресурсов КИС ($M^{(3)}$). В автореферате из-за ограниченности места приведено упрощенное описание логико-динамической модели программного управления функционированием КИС ($M^{(2)}$), которая учитывает этап модернизации ее основных элементов и подсистем:

$$M^{(2)} = \left\{ \begin{array}{l} \mathbf{u} | \dot{x}_j^{(2)} = \sum_{s=1}^v u_{js}^{(2)}; \quad \dot{x}_r^{(2)} = \sum_{s=1}^v w_{sr}^{(2)}; \\ \sum_{j=1}^m u_{js}^{(2)}(t) \leq [P_s (1 - \gamma_r^{(3)}) + \bar{P}_s \gamma_r^{(3)}]; \quad 0 \leq \sum_{s=1}^v u_{js}^{(2)}(t) \leq [e_s (1 - \gamma_r^{(3)}) + \bar{e}_s \gamma_r^{(3)}] w_{sr}^{(2)}; \\ \text{для } t \in (t_0, t_f] = T; x_j^{(2)}(t_0) = 0; \quad x_j^{(2)}(t_f) = a_j^{(2)}; \quad x_s^{(2)}(t_f) = \mathbb{R}; \\ \sum_{r=1}^g w_{sr}^{(2)} \left[\sum_{\beta \in \Gamma_2} (a_\beta^{(2)} - x_\beta^{(2)}(t)) + \sum_{\eta \in \Gamma_3} (a_\eta^{(3)} - x_\eta^{(3)}(t)) \right] = 0; \\ \sum_{r=1}^g w_{sr}^{(2)}(t) \leq \varepsilon_s, \forall s; \quad \sum_{s=1}^v w_{sr}^{(2)}(t) \leq \theta_r, \forall r; w_{sr}^{(2)} \in \{0, u_{ij}^{(1)}\}; \gamma_r^{(3)} \in \{0, 1\}; \\ j = 1, \dots, m; s = 1, \dots, v; r = 1, \dots, g. \end{array} \right. \quad (2)$$

Заданы показатели качества вида:

$$J_4^{(2)} = \sum_{j=1}^m \sum_{s=1}^v \sum_{r=1}^g \int_{t_0}^{t_f} \delta_{js}^{(2)}(\tau) \cdot w_{sr}^{(2)}(\tau) d\tau, \quad (3) \quad J_5^{(2)} = \sum_{s=1}^v \sum_{r=1}^g \int_{t_0}^{t_f} c_{sr}^{(2)}(\tau) \cdot w_{sr}^{(2)}(\tau) d\tau, \quad (4) \quad J_6^{(2)} = \frac{1}{2} \sum_{j=1}^m [a_j^{(2)} - x_j^{(2)}(t_f)]^2, \quad (5)$$

где $x_j^{(2)}$ – переменная, характеризующая состояние операции предоставления *информационного сервиса* БП в момент времени t ; $u_{js}^{(2)}$ – управляющее воздействие, принимающее значение «1», если операция БП D_j ($j = 1, \dots, m$) выполняется с использованием информационного сервиса B_s ($s = 1, \dots, v$), и значение «0» – в противоположном случае; $x_r^{(2)}$ – переменная, которая численно равно продолжительности использования информационного ресурса КИС B_r ($r = 1, \dots, g$); $w_{sr}^{(2)}$ – это управляющее воздействие, принимающее значение «1», если операция информационного сервис задействует информационный ресурс, и значение «0» – в противоположном случае; $\gamma_r^{(3)}$ – это вспомогательное управляющее воздействие, принимающее значение «1» в момент времени t , если произведено обновление (замена) ресурса КИС B_r , и значение «0», если модернизация не проведена. Верхний индекс (3) указывает на то, что управляющее воздействие относится к модели программного

управления модернизацией ресурсов КИС ($M^{(3)}$); P_s, e_s – это заданные величины, которые характеризуют соответственно максимально возможную интенсивность реализации операций информационного сервиса на B_r ресурсе КИС и максимально возможную производительность B_r ресурса до модернизации; \bar{P}_s и \bar{e}_s – заданные величины имеют аналогичную интерпретацию, но соответствуют ситуации, когда модернизация ресурсов КИС проведена; t_0, t_f – начальный и конечный моменты времени; a_i – заданный объем операций; T – интервал времени, на котором рассматривается процесс функционирования и модернизации КИС; $a_j^{(2)}$ – заданная константа, определяющая объем операций информационных сервисов; $\beta \in \Gamma_2$ – множество номеров операций, непосредственно предшествующих и технологически связанных с операцией предоставления информационного сервиса БП с помощью логических операций «И»; $\eta \in \Gamma_3$ – множество номеров операций модернизации ресурсов КИС, технологически связанных с помощью логических операций «И» с информационным ресурсом B_r . Другими словами, информационный сервис не может быть предоставлен до тех пор, пока не выполнены все операции, входящие в технологический цикл предоставления информационной услуги, а также в период проведения модернизации ресурса КИС, который задействован в поддержке данного сервиса. Именно учет подобных логических межуровневых ограничений позволяет разработанные модели отнести к классу логико-динамических; ε_s и θ_r – это известные константы, которые определяют возможность одновременного использования нескольких информационных ресурсов для обеспечения функционирования информационного сервиса и наоборот; $\delta_{js}^{(2)}$ – функция позволяет оценить суммарное качество операции предоставления информационного сервиса БП на этапе параллельного функционирования и модернизации КИС; $c_{sr}^{(2)}$ – стоимостная функция времени, описывающая косвенные, т.е. эксплуатационные затраты (администрирование, техническая поддержка и т.д.), связанные с функционированием и модернизацией информационного сервиса; показатель вида (3) предназначен для оценивания качества планирования процессов функционирования и модернизации КИС на уровне предоставления информационных сервисов ($M^{(2)}$); показатель вида (4) предназначен для оценивания суммарных эксплуатационных затрат, связанных с процессами функционирования и модернизации КИС на уровне информационных сервисов; показатель (5) введен для минимизации потерь, вызванных невыполнением соответствующих операций.

В основе представленного в диссертации иерархического полимодельного описания процессов функционирования и модернизации КИС находятся логико-динамические модели программного управления стратами СТО, опирающиеся на принципы сервис-ориентированного, функционально-стоимостного подходов и управления структурной динамикой, что позволяет учесть изменчивость всех основных пространственно-временных, технических и технологических ограничений, связанных с указанным этапом жизненного цикла, а также осуществить оптимизацию важнейшего экономического показателя качества разрабатываемых комплексных планов – ССВ.

В третьей главе проведен анализ существующих процедур получения экспертных знаний в интеллектуальных системах поддержки принятия решений, который показал, что на данной стадии нередко возникает множество проблем,

связанных с оперативность проведения опроса и сложностью интерпретации полученных результатов. Для устранения данного недостатка в диссертация был разработан комбинированный алгоритм синтеза оптимальных комплексных планов функционирования и модернизации КИС, а также методика динамического многокритериального оценивания качества скоординированных программ проведения работ по обновлению информационной инфраструктуры.

Новый комбинированный алгоритм поиска и оптимизации комплексных планов функционирования и модернизации КИС базируется, во-первых, на методе последовательных приближений Крылова-Черноуьско. Ниже представлены его основные шаги:

Шаг 1. Задается диспетчерское решение $\mathbf{u}^{(disp)}(t)$, $t \in (t_0, t_f]$. Подобный план также называют «допустимым», т.к. он удовлетворяет всем ограничениям, наложенным на вектор управления. В качестве $\mathbf{u}^{(disp)}(t)$ могут быть использованы различные эвристические принципы.

Шаг 2. Проводится интегрирование основной системы уравнений с начальными условиями $\mathbf{u}(t) = \mathbf{u}^{(disp)}(t)$ от начального до конечного момента времени. Результатом является $\mathbf{x}(t)$, $\forall t \in (t_0, t_f]$ и значение обобщенного показателя качества программного управления в конечный момент времени для моделей $(M^{(1)}, M^{(2)}, M^{(3)})$, который принимается за рекорд.

Шаг 3. Интегрирование сопряженной системы уравнений с начальными условиями, определенными в результате расчета условий трансверсальности и $\mathbf{u}(t) = \mathbf{u}^{(disp)}(t)$ от конечного до начального момента времени. В начальный момент времени вычисляется первое приближение начальных условий для сопряженной системы уравнений вида $-\Psi^{(opt)}(t)$. На этом заканчивается итерация (r) с номером «0».

Шаг 4. Далее, от начального момента времени к конечному моменту времени происходит поиск нового управления $\mathbf{u}^{(r+1)}(t)$ ($r = 0, 1, 2, \dots$ – номер итерации). Функция Гамильтона на данном этапе должна принимать максимальное (экстремальное) значение, (с учетом ограничений, которые наложены на управление $\mathbf{u}(t)$). Одновременно с максимизацией Гамильтониана интегрируется основная и сопряженная системы уравнений. Важно отметить, что в каждый момент времени происходит параллельное решение нескольких классов задач математического программирования. При максимизации соответствующих частных функций частных Гамильтонианов для каждой модели может решаться задача о назначениях, задача линейного программирования с бивалентными переменными; задачи линейного программирования; задачи с двухсторонними ограничениями.

Шаг 5. Проверка условия:

$$|J_{oo}^{(r)}(t_f) - J_{oo}^{(r-1)}(t_f)| < \varepsilon, \quad (6)$$

где ε – заданная точность; r – номер итерации. Если условие не выполняется, то переход на шаг 3.

Шаг 6. Выход из алгоритма. Итерационного процесса синтеза экстремального комплексного плана функционирования и модернизации КИС заканчивается в том случае, когда на шаге 5 выполняются заданные условия. После этого происходит выдача $\mathbf{u}^*(t)$, $\Psi^*(t)$, $J^{(opt)}$.

Второй составляющей комбинированного алгоритма является алгоритм формирования нового результирующего показателя качества комплексных планов

функционирования и модернизации КИС для каждого уровня СТО ($M^{(1)}$, $M^{(2)}$, $M^{(3)}$) на основе нечетко-возможностного подхода. Ниже представлены его основные шаги:

Шаг 1. Формирование лингвистической шкалы для каждого частного показателя, который оценивает качество комплексных планов функционирования и модернизации КИС, и перевод частных показателей в шкалу $[-1, +1]$.

Шаг 2. На основе построенного ортогонального плана проводится опрос экспертов (ответы на вопросы формируются в виде продукционных правил).

Шаг 3. Формирование нечетко-возможностного полинома (формализованных знаний экспертов в виде выражения (свертки)), который в дальнейшем используется как обобщенный показатель качества.

Для окончательного согласования указанных алгоритмов, а также в целях проведения управленческо-стоимостной координации комплексных планов функционирования и модернизации КИС необходимо использовать разработанную в диссертации методику динамического многокритериального оценивания качества соответствующих планов, которая состоит из следующих этапов:

Этап 1. Ввести элементы показателя ССВ в виде критериальных функции (см. (3)) в логико-динамические модели ($M^{(1)}$, $M^{(2)}$, $M^{(3)}$). Это могут быть различные виды затраты, соответствующие каждому уровню иерархий СТО.

Этап 2. Привести интегральные показатели качества (см. (4) и (5)) логико-динамических моделей ($M^{(1)}$, $M^{(2)}$, $M^{(3)}$) к терминальному виду (задача Майера).

Этап 3. Преобразовать функцию Гамильтона, сопряженную систему уравнений и условия трансверсальности в необходимую форму, требуемую для корректного решения задач оптимального управления со смешанными ограничениями.

Предложенная в диссертации методика позволяет:

1. Провести комплексную целевую и ресурсную координацию комплексных планов функционирования и модернизации КИС;
2. Учесть «неявные» знания экспертов непосредственно на этапе синтеза комплексных планов функционирования и модернизации КИС, т.к. использование указанной методики приводит к изменению вида основной системы уравнений, краевых условий, Гамильтониана, сопряженной системы и условий трансверсальности.

Именно использование нечетко-возможностного подхода (использование соответствующего полинома) позволяет корректно ввести показатель ССВ в состав разработанной логико-динамической модели комплексного планирования (программного управления) функционирования и модернизации КИС, а также провести его динамическую интерпретацию.

Достоинством разработанного в диссертации комбинированного алгоритма, отличающего его от известных, является не только возможность учета сложности взаимосвязей показателей качества, используемых для оценивания и оптимизации комплексных планов функционирования и модернизации КИС, но и опора на фундаментальные научные и практические результаты, полученные в теории оптимального управления сложными динамическими объектами, что позволило повысить оперативность разработки скоординированных программ модернизации и их обоснованность, а также обеспечить оптимальность принимаемых управленческих решений.

В четвертой главе представлено описание разработанного в диссертации оригинального модельно-алгоритмического обеспечения, реализованного в виде прототипа программного модуля, который был использован для решения

практических задач планирования функционирования и модернизации КИС в различных проектах (коммерческих и научно-исследовательских). На конкретном примере продемонстрировано решение задачи комплексного планирования функционирования и модернизации подсистем КИС крупной производственной компании.

Постановка задачи заключалась в поиске оптимальной программы обновления информационной инфраструктуры (проведения инфраструктурного проекта), которая позволит своевременно и полностью выполнить все операции, входящие в соответствующие технологические циклы на различных уровнях иерархии предприятия, при этом обобщенный показатель качества должен быть минимизирован (должны быть минимизированы затраты всех видов ресурсов при условии не ухудшения качества управления БП).

Дополнительно требовалось учесть технологические и пространственно-временные ограничения, связанные как с процессами функционирования КИС, так и с процессами модернизации соответствующих информационных ресурсов. На рисунке 2 представлена визуализация исходных данных и задач, стоящих на этапе разработке соответствующего комплексного плана.



Рисунок 2. Схема взаимосвязи внешних с внутренними сервисами и (опосредованно) с ресурсами КИС на этапе модернизации

Модернизация КИС может проводиться как экстенсивным, так и интенсивным путем. В диссертации рассматривается комбинированный вариант проведения обновления информационной инфраструктуры.

Использование в рамках разработанного прототипа программного модуля логико-динамических моделей и комбинированного алгоритма синтеза комплексных планов модернизации и функционирования КИС позволили в среднем повысить на 5-15% показатели полноты и оперативности выполнения операций, составляющих синтезированные программы. Стоимостные показатели качества комплексных планов функционирования и модернизации КИС были улучшены в среднем на 10-14% по сравнению со значениями аналогичных показателей, но рассчитываемых при использовании традиционных эвристических методов и алгоритмов решения задач календарного планирования и составления расписаний.

В диссертации проведено исследование влияния количества доступных ресурсов и их унифицированности на значение показателей качества комплексных планов функционирования и модернизации КИС. В ходе проведения экспериментов были выявлены следующие закономерности:

1. Разработанный в диссертации комбинированный алгоритм, опирающийся на полимодельное логико-динамическое описание предметной области, требует бóльшего процессорного времени, чем эвристические алгоритмы, следовательно, область его непосредственного применения ограничена системами, не предъявляющими жестких требований к времени отклика.

2. Первое приближение вектора сопряженной системы $\Psi(t_0)$ в наибольшей степени определяет скорость сходимости разработанного в диссертации алгоритма оптимизации комплексных планов функционирования и модернизации КИС. Таким образом, принципиальное значение для оперативности решения задач синтеза программ проведения модернизации КИС и выбора из них наиболее предпочтительных имеет «диспетчерский план» (допустимое управление), который формируется на первом шаге алгоритма последовательных приближений.

3. Наибольший эффект от использования разработанного подхода достигается при умеренном количестве унифицированных ресурсов, т.е. более 65% модернизируемых и внедряемых ресурсов обладают технической возможностью поддерживать более двух сервисов КИС.

4. Сложность разработанного алгоритма является полиномиальной.

Основу разработанного программного модуля составила прикладная теория управления структурной динамикой СТО, нечетко-возможностный и сервис-ориентированный подходы, позволившие в совокупности проводить многокритериальное оценивание введенных показателей качества, а также оптимизацию модернизационных программ. Указанные элементы теорий и подходов были использованы в указанном прототипе.

Отличительной особенностью разработанного модуля является автоматическое назначение динамических приоритетов показателей качества комплексных планов функционирования и модернизации КИС, вес которых меняется ситуационно в зависимости от текущих и прогнозируемых условий обстановки, что повышает обоснованность принимаемых решений. Опора на программном уровне на разработанные логико-динамические модели и алгоритмы оптимизации позволяют сократить цикл и объем взаимодействия модуля с экспертом предметной области до нескольких итерации, что существенно повышает оперативность решения задач синтеза управляющих воздействий.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе проведенных исследований были решены следующие задачи:

1. На основе сервис-ориентированного и функционально-стоимостного подходов проведена оригинальная динамическая формализация процессов функционирования и модернизации КИС, что позволило в дальнейшем повысить обоснованность, оперативность и качество принимаемых управленческих решений.

2. Разработан комплекс логико-динамических моделей ($M^{(1)}$, $M^{(2)}$, $M^{(3)}$), который позволил учесть в единой шкале времени динамику интервально заданных важнейших межуровневых пространственно-временных, технологических и технических ограничений рассматриваемой предметной области.

3. Используя сервис-ориентированный, нечетко-возможностный и функционально-стоимостной подходы, а также научно-практические результаты, полученные в современной теории управления, были разработаны новый комбинированный алгоритм и методика динамического многокритериального оценивания и оптимизации комплексных планов функционирования и модернизации КИС, которые позволили существенно уменьшить размерность решаемой задачи, а

также упростить и ускорить процедуру поиска экстремальных (оптимальных) программ функционирования и модернизации КИС.

4. Разработан прототип программного модуля, который успешно прошел апробацию в различных предметных областях, что дополнительно подтвердило достоверность проведенных исследований.

Перспективными направлениями дальнейших диссертационных исследований по рассматриваемой проблематике являются задачи разработки: методов оценивания робастности и устойчивости разрабатываемых оптимальных программ функционирования СТО на различных стадиях жизненного цикла; методов улучшения скорости сходимости разработанного в диссертации алгоритма; моделей, методов и алгоритмов, которые позволят конструктивно описывать функционирование эргатических подсистем СТО.

Положения, выносимые на защиту, соотнесены с пунктами паспорта специальности 05.13.01 – «Системный анализ, управление и обработка информации» (технические науки): п. 3. «Разработка критериев и моделей описания и оценки эффективности решения задач системного анализа, оптимизации, управления, принятия решений и обработки информации», п. 5. «Разработка специального математического и алгоритмического обеспечения систем анализа, оптимизации, управления, принятия решений и обработки информации».

ОСНОВНЫЕ РАБОТЫ, ОПУБЛИКОВАННЫЕ АВТОРОМ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в рецензируемых изданиях ВАК:

1. **Захаров, В. В.** Программно-математическое обеспечение процесса модернизации сложных объектов / В.В.Захаров // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. - 2020. - Т. 63. N 11. - С. 975-984. **(05.13.01)**
2. **Захаров В.В.,** Совместное оперативное планирование измерительных и вычислительных операций в киберфизических системах / Б.В.Соколов, В.В.Захаров, Д.И.Назаров // Научное приборостроение. - 2020. - Т.30. N 3. - С. 49-62. **(05.13.01)**
3. **Захаров, В. В.** Динамическая интерпретация формального описания и решения задачи модернизации сложных объектов / В.В.Захаров // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. - 2019. - Т. 62. N 10. - С. 914-920. **(05.13.01)**
4. **Захаров В. В.** Динамический подход к планированию модернизации автоматизированных систем управления производственными объектами / В.В.Захаров, В.А. Ушаков // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. - 2019. - Т.62. N 6. - С. 585-588. **(05.13.01)**

Публикации в изданиях, проиндексированных в Web of Science/SCOPUS:

5. **Zakharov, V.** Integrated dynamic planning and scheduling of enterprise information system modernization. / V. Zakharov, B. Sokolov, O. Kofnov, V. Saluhov // Proceedings of the 32nd European Modeling & Simulation Symposium. – 2020. P. 270-276.
6. **Zakharov, V. Sokolov B., Pavlov A., Potriasaev S.,** Methodology and Technologies of the Complex Objects Proactive Intellectual Situational Management and Control in Emergencies / B. Sokolov, A. Pavlov, S. Potriasaev, V. Zakharov // Proceedings of the Fourth International

Scientific Conference “Intelligent Information Technologies for Industry”. - 2019. – P. 234-243.

7. **Zakharov, V.** Technology Resolution Criterion of Uncertainty in Intelligent Distributed Decision Support Systems / A. Pavlov, D. Pavlov, V. Zakharov // Proceedings of the 13th International Symposium on Intelligent Distributed Computing – 2019. – P.365–373.

8. **Zakharov, V.** Modification of Multiple-model Description and Planning and Update Control Algorithms of Supply Chain / B. Sokolov, I. Trofimova, D. Nazarov, V. Zakharov // IFAC-PapersOnLine, – 2019. – P. 1972-1977.

В других изданиях:

9. **Захаров, В.В.** Методы и алгоритмы комплексного проактивного управления сложными объектами в чрезвычайных ситуациях / В.В. Захаров // В книге: Моделирование и анализ безопасности и риска в сложных системах. Сборник статей Международной научной конференции. Под редакцией Е.Д. Соложенцева. - 2020. С. 147-152.

10. **Захаров, В.В.** Методология и технология проактивного управления модернизацией в современных условиях / Б.В. Соколов, В.В. Захаров, Н.О. Азаркина, И.А. Ипатьева // В книге: Логистика: современные тенденции развития. Материалы XVIII Международной научно-практической конференции. - 2019. - С. 116-122.

11. **Захаров, В.В.** Модельно-алгоритмическое обеспечение планирования модернизации судостроительных производств / А.Н. Павлов, В.В. Захаров // В книге: Пятая международная научно-практическая конференция. «Имитационное и комплексное моделирование морской техники и морских транспортных систем» (ИКМ МТМТС-2019). Труды конференции. – 2019. - С.133-137.

12. **Захаров, В.В.,** Распределенная система поддержки принятия управленческих решений ситуационного центра / А.В. Алексеев, В.В. Захаров, М.Ю. Охтилев, В.В. Бураков // В книге: XIII Всероссийское совещание по проблемам управления ВСПУ-2019: ТРУДЫ. - 2019. - С.1664-1668.

13. **Захаров, В.В.,** Методы и алгоритмы планирования модернизации корпоративной информационной системы на основе технологий промышленного интернета вещей. / Б.В. Соколов, В.В. Захаров, Кулаков А.Ю. // В книге: Перспективные направления развития отечественных информационных технологий. Материалы V межрегиональной научно-практической конференции. - 2019. - С. 209-210.

14. **Захаров, В.В.,** Соколов Б.В., Кулаков А.Ю. Модели и алгоритмы синтеза технологий и программ управления робототехническими системами / Б.В. Соколов, В.В. Захаров, Кулаков А.Ю. // В книге: Перспективные направления развития отечественных информационных технологий. материалы V межрегиональной научно-практической конференции. - 2019. - С. 211-212.

15. **Захаров, В.В.** Управление развитием производственных объектов. / В.В. Захаров // В книге: XIII Всероссийское совещание по проблемам управления ВСПУ-2019. Сборник трудов XIII Всероссийского совещания по проблемам управления (ВСПУ-2019). - 2019. - С. 3114-3119.

16. **Захаров, В.В.** Модельно-алгоритмическое обеспечение планирования модернизации сложных организационно-технических объектов. / В.В. Захаров // В книге: Технологическая перспектива в рамках Евразийского пространства: новые рынки и точки экономического роста. Труды 5-ой Международной научной конференции - 2019. - С. 486-494.

17. **Захаров, В.В.** Модели и методы синтеза технологий и программ управления реконfigurацией бортовых систем малых космических аппаратов / В.В. Захаров, Б.В. Соколов, Ф.М. Кулаков // В книге: Перспективные направления развития отечественных информационных технологий: материалы V межрегиональной научно-практической конф. Севастополь, 24-28 сентября 2019 г. - 2019. - С.211–212.

18. **Захаров, В.В.** Методологические и методические основы решения проблемы выбора эффективных вариантов функционирования информационно-управляющих комплексов / В.В. Захаров, В.В. Касаткин, Н.А. Мустафин, А.Н. Павлов, Б.В. Соколов // В книге: Перспективные направления развития отечественных информационных технологий. материалы IV межрегиональной научно-практической конференции - 2018. - С. 146-148.

19. **Захаров, В.В.** Содержательная и формальная постановка задачи планирования технического перевооружения промышленного объекта. / В.В. Захаров // В книге: Региональная информатика и информационная безопасность. Сборник трудов межрегиональной конференции и Санкт-Петербургской международной конференции. 2018. - С. 250-253.

20. **Захаров, В.В.**, Информационная технология определения местоположения мобильного робототехнического комплекса методами радиочастотной идентификации. / В.В. Захаров, С.А. Потрясаев, В.И. Салухов, В.П. Шкодырев // В книге: Управление в морских и аэрокосмических системах (УМАС-2016). Материалы 9-ой Мультиконференции по проблемам управления. - 2016. - С. 104-111.