

На правах рукописи



Потрясаев Семен Алексеевич

**СИНТЕЗ ТЕХНОЛОГИЙ И КОМПЛЕКСНЫХ ПЛАНОВ
УПРАВЛЕНИЯ ИНФОРМАЦИОННЫМИ ПРОЦЕССАМИ
В ПРОМЫШЛЕННОМ ИНТЕРНЕТЕ**

Специальности: 05.13.11 – Математическое и программное обеспечение
вычислительных машин, комплексов и компьютерных сетей,
05.13.01 – Системный анализ, управление и обработка информации
(технические системы)

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

Санкт-Петербург – 2020

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Санкт-Петербургском институте информатики и автоматизации Российской академии наук (СПИИРАН)

Научный консультант:	Соколов Борис Владимирович доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник лаборатории информационных технологий в системном анализе и моделировании Санкт-Петербургского института информатики и автоматизации Российской академии наук (СПИИРАН)
Официальные оппоненты:	Мещеряков Роман Валерьевич доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник лаборатории №80 «Киберфизических систем» Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института проблем управления имени В.А. Трапезникова Российской академии наук Басыров Александр Геннадьевич доктор технических наук, профессор, начальник кафедры информационно-вычислительных систем и сетей федерального государственного бюджетного военного образовательного учреждения высшего образования «Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского» Громов Виктор Никифорович доктор технических наук, профессор, профессор Высшей школы киберфизических систем и управления федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого»
Ведущая организация:	Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Балтийский государственный технический университет "ВОЕНМЕХ" им. Д.Ф. Устинова»

Защита диссертации состоится «___» _____ 2020 г. в ___ часов ___ минут на заседании диссертационного совета Д 002.199.01, созданного на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Санкт-Петербургского института информатики и автоматизации Российской академии наук по адресу: 199178, Санкт-Петербург, 14 линия В.О., д. 39.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте Федерального государственного бюджетного учреждения науки Санкт-Петербургского института информатики и автоматизации Российской академии наук <http://www.spiiras.nw.ru>

Автореферат разослан «___» _____ 2020 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 002.199.01
кандидат технических наук



А.А. Зайцева

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы диссертации.

В настоящее время информация и знания всё в большей мере становятся стратегическим ресурсом общества. Новая общественно-экономическая формация – информационное общество и его цифровая экономика, наиболее эффективно и динамично развиваются на основе максимально полного использования имеющихся информационных ресурсов и средств их обработки. При этом главной компонентой цифровой экономики вообще и в частности цифрового производства становятся разнообразные киберфизические системы (КФС) и промышленный интернет (ПрИ), которые с позиций данной диссертационной работы можно принять тождественными. В существующих и перспективных КФС наряду с функциями позиционирования, контроля и диагностики как самих себя, так и управляемых ими материальных производственных процессов, также реализованы функции автоматического составления отчетов о состоянии соответствующей подсистемы контролируемого оборудования, в том числе, данных о всех возникающих неисправностях; об остатке ресурса изнашиваемых деталей; о ресурсе расходных материалов; загрузке оборудования и режиме его эксплуатации. Их применение открывает новые широкие возможности по динамическому ситуационному распределению информационно-управленческих и вычислительных задач между встроенными системами, средствами связи и облачными вычислительными ресурсами, но и накладывает жёсткие ограничения на быстродействие, стоимость и энергопотребление указанных устройств и подсистем. Таким образом, для повышения эффективности функционирования современных цифровых производств необходимо создать новую архитектуру, соответствующее математическое обеспечение (модели, методы, алгоритмы) и программные комплексы управления информационными процессами в КФС (ПрИ), что, в конечном итоге, оказывает существенное влияние на повышение производительности труда на уровне материального производства.

Существующий пробел в методах строгого формального решения задач обоснованного выбора технологии и синтеза планов управления информационными процессами КФС (ПрИ) при их проектировании и эксплуатации традиционно объясняется сложностью данных задач, имеющих комбинаторную природу и большую размерность. Поэтому на практике данные задачи чаще всего решаются с использованием различных эвристических методов и алгоритмов.

Таким образом, в современных условиях существует настоятельная необходимость в теоретическом обосновании и практической реализации нового математического и программного обеспечения синтеза технологий и комплексных планов управления информационными процессами в ПрИ, позволяющего объединить существующие и перспективные разнотипные технологии, а также системы организации вычислений и на этой основе повысить эффективность промышленного производства.

Проведенный анализ показывает, что данная проблема с формальной точки зрения относится к проблеме многокритериального динамического структурно-функционального синтеза сложных организационно-технических объектов (СОТО), которыми являются КФС (ПрИ).

Степень разработанности темы. К настоящему времени рассматриваемый в диссертации класс задач синтеза технологий и комплексных планов управления информационными процессами в ПрИ интернете изучен недостаточно глубоко. Так, фундаментальные научные основы решения задач синтеза различных видов технических структур сложных объектов (первое направление) представлены в работах Цвиркуна А.Д., Моисеева Н.Н., Месаровича М., Мако Д. и Такахары Я. Решение задач синтеза функциональной структуры (программ и законов управления) сложных технических объектов (СТО) при известной технической структуре (второе направление) изложено в многочисленных трудах научных школ, возглавляемых известными зарубежными учеными как Атанс М. и Фалб П., Заде Л., Акоффа Р.Л., Брайсона А. и Хо-Ю-Ши, Беллмана Р., а также научных школ, возглавляемых в разное время такими отечественными учеными как академики Понтрягин Л.С, Моисеев Н.Н., Черноусько Ф.Л., Васильев С.Н., профессора Болтянский В.Г, Алексеев В.М., Тихомиров В.М., Фомин С.В. Первые значимые результаты в направлении синтеза программ создания и развития сложных технических систем без этапа поддержки унаследованных систем (третье направление) были получены в работах: Дзюбановского С.А. и Озеряного Н.А., Рингланда Дж., Кларка Е.М. и Нихолаона К.Н., Ранделя Б. Направление решения задачи параллельного (одновременного) синтеза технической и функциональной структур сложных технических объектов

(четвёртое направление) описано в публикациях Калинина В.Н., Резникова Б.А., Варакина Е.И., Зимина И.Н. и Иванилова Ю.П., Клира Дж., Скурихина В.И., Юсупова Р.М., Соколова Б.В., Охтилева М.Ю., Цивирко Е.Г. Последнее из указанных направлений исследований в наибольшей степени соответствует решаемой в диссертации проблеме.

Наряду с решением задач синтеза структур СОТО к настоящему времени значительный опыт накоплен в решении задач автоматизации процессов планирования информационных процессов, обеспечивающих функционирование отдельных элементов и подсистем современных территориально-распределенных производственных комплексов. Однако решение частных задач планирования разрозненных информационных процессов приводит к несогласованности функционирования подсистем промышленного интернета, отсутствию ориентации задач планирования на повышение эффективности в целом процессов управления применением КФС.

Анализ результатов, выполненных в рамках указанных выше четырёх направлений решения проблемы многокритериального структурно-функционального синтеза СОТО, позволил выявить главное противоречие, возникающее при ее решении. Оно заключается в том, что определение оптимальных планов управления информационными процессами в При может быть выполнено лишь после того, как станет известен перечень и распределение тех функций (алгоритмов, операций), которые должны быть реализованы в его подсистемах в рамках указанных процессов. Однако распределение функций (алгоритмов и операций), управления информационными процессами в промышленном интернете, по его подсистемам зависит от структуры и параметров законов управления указанными информационными процессами. Также важно учитывать, что характеристики узлов и подсистем, а также каналов связи, могут изменяться как из-за внутренних причин, так и по действием внешней среды.

Таким образом в результате проведенного анализа современного состояния и основных тенденций развития научно-методических основ решения задач управление информационными процессами в СОТО (в том числе КФС) можно сделать вывод, что решаемая в диссертации научная проблема, состоящая в разработке прикладной теории синтеза технологий и комплексных планов управления информационными процессами в киберфизических системах и её применении для решения задач системного моделирования и управления территориально-распределённой обработкой и использованием полученных данных в промышленном интернете в интересах повышения его эффективности, является новой и актуальной.

Цель диссертационного исследования состоит в повышении оперативности, устойчивости и в целом эффективности управления КФС на основе разработки теории синтеза технологий и программ управления ими.

В соответствии с поставленной целью в диссертационной работе сформулированы следующие **научные и научно-технические задачи**:

1. Системный анализ и формализация проблемы синтеза технологий и программ управления информационными процессами в промышленном интернете.
2. Разработка и исследование комплекса моделей, методов и технологии системного моделирования процессов синтеза технологий и программ управления информационными процессами в промышленном интернете при различных сценариях воздействия внешней среды.
3. Обоснование и синтез архитектуры и вариантов функционирования программных комплексов, обеспечивающих решение исследуемой проблемы.
4. Разработка и исследование комбинированных методов, алгоритмов и программных комплексов решения задач синтеза технологий, программ управления информационными процессами в промышленном интернете, задач оценивания возможностей и обеспечения устойчивости проактивного управления указанными информационными процессами.
5. Расширение языка описания бизнес-процессов BPMN для обеспечения возможности использования его в качестве единой основы для согласования моделей разработанного полимодельного комплекса, а также использования при решении прикладных задач с использованием разработанного программного комплекса.
6. Разработка методологии и технологии использования контейнерной виртуализации в промышленном интернете для реализации комплексных планов управления информационными процессами в промышленном интернете на этапе эксплуатации.

7. Решение прикладных задач синтеза технологий и планов функционирования бортовых и наземных комплексов управления космическими аппаратами, планов функционирования судостроительного предприятия, комплексного оперативного многовариантного прогнозирования наводнений.

Объектом исследования в диссертационной работе являются информационные процессы в киберфизических системах и промышленном интернете, а также системы и технологии управления ими.

Предметом диссертационного исследования являются методологические и методические основы, а также программные средства решения задач синтеза технологий и комплексных планов управления информационными процессами в промышленном интернете.

Методы исследования. В качестве основной методологии и методов проведения диссертационных исследований были выбраны методология системного анализа и современной теории управления сложными динамическими объектами. При этом, широко использовались модели, методы и алгоритмы развиваемые в теории множеств и отношений, теории вероятности и теории возможности, теории автоматов и алгоритмов, программной инженерии, теории информационных систем и процессов, теории оптимального управления логико-динамическими системами, теории многокритериального выбора и исследований операций.

Научная новизна полученных результатов состоит в следующем:

1. Разработан *комплекс аналитико-имитационных логико-динамических моделей* управления КФС, который представлен в виде многоуровневого альтернативного динамического системного графа с перестраиваемой структурой. Новизна предложенного обобщенного описания состоит в том, что с его помощью обеспечивается на концептуальном, модельно-алгоритмическом, информационном и программном уровнях детализации корректное согласование разработанных в диссертации аналитико-имитационных моделей управления структурной динамикой (УСД) КФС с ранее предложенными их логико-алгебраическими и логико-лингвистическими аналогами, построенными на основе интеллектуальных информационных технологий. В отличие от существующих сценарных поведенческих моделей функционирования КФС, базирующихся на конечно-автоматных и имитационных описаниях, предложенный логико-динамический подход позволяет на конструктивном уровне решать одновременно как задачи синтеза технологий функционирования КФС, так и задачи комплексного планирования информационных процессов промышленного интернета вещей.

2. В разработанном полимодельном комплексе реализован *оригинальный способ динамического описания базовых логических функций «И», «ИЛИ», «альтернативное ИЛИ», «НЕ»* и соответствующих технологических ограничений, при котором сохраняется принадлежность синтезируемых программных управлений КФС к классу кусочно-непрерывных функций. Это позволяет для решения задач синтеза технологий и комплексных планов управления информационными процессами в КФС и в целом в промышленном интернете на конструктивном уровне использовать научные и научно-технические результаты классической и современной теорий управления. Достоинство и новизна предложенных логико-динамических моделей функционирования КФС состоит в том, что с их помощью удастся описать не только процессы синтеза технологий и комплексных планов обеспечения информацией промышленного интернета, но и взаимосвязанные с ними процессы коррекции планов или процессы перепланирования, процессы мониторинга и управления реализацией ранее составленных планов, обеспечивая, тем самым, корректную («бесшовную») межмодельную координацию за счёт использования единого языка описания рассматриваемых процессов.

3. Предложены *методы и алгоритмы, позволяющие выполнить новое преобразование традиционных дискретных моделей* календарного планирования и теории расписаний, используемых для управления информационными процессами, в логико-динамические модели, описывающие данные процессы. То есть, дискретная по своей «природе» исходная задача управления КФС преобразуется в задачу неклассического вариационного исчисления, которая, в свою очередь, сводится к нелинейной краевой задаче. В отличие от традиционных процедур поиска оптимальных планов управления информационными процессами на статических моделях, данный переход позволяет существенно упростить поиск указанных планов за счёт динамической декомпозиции исходной большеразмерной модели календарного планирования и составления расписаний, описывающей задачи синтеза технологий и планов в рассматриваемой предметной области.

4. Разработаны новые *комбинированные модели и алгоритмы планирования операций*, распределения ресурсов, а также учета прерываний в нестационарных задачах теории расписаний большой размерности, к которым сводятся детерминированные задачи управления КФС. В их основе лежит метод последовательных приближений в сочетании с методом Ньютона, методом штрафных функционалов, обобщенным субградиентным методом, методом «ветвей и границ». Новизна и эффект от использования перечисленных методов состоит в их комбинированном применении, когда достоинства одних методов компенсируют недостатки других. Проведены оценки временной и емкостной сложности разработанных методов и алгоритмов приближенного решения рассматриваемых задач синтеза технологий и планов, которые, в отличие от традиционных подходов к решению задач расписания данного класса, имеют полиномиальный характер, а также выявлены параметры, от которых в наибольшей степени зависит скорость сходимости данных алгоритмов.

5. Проведён анализ и осуществлён *обоснованный выбор (в отличие от существующих эвристических подходов) архитектуры создаваемой информационной платформы*. Новизна данного подхода состоит в том, что он базируется на результатах использования комбинированного метода многокритериального принятия решений, в основу которого положена идея совместного использования продукционных моделей предпочтений лица, принимающего решения (ЛПР), а также нечётко-возможностного подхода и теории планирования экспериментов, направленных на извлечение экспертных знаний о заданной предметной области. Одновременно с этим были получены как численные оценки частных показателей, характеризующих качество вариантов альтернативных архитектур, так и обобщённый показатель их эффективности, что позволяет в дальнейшем ситуационно и обоснованно переходить к другим архитектурам информационной платформы для решения соответствующих классов прикладных задач в промышленном интернете.

6. Существующий *стандарт BPMN (Business Process Model and Notation, нотация и модель бизнес-процессов) расширен новыми сущностями*, соответствующими предложенным в диссертации вариантам формального логико-динамического описания процессов функционирования КФС. Это позволило, находясь в рамках существующих международных стандартов, произвести раздельное конструктивное описание функциональной структуры промышленного интернета и технических особенностей её аппаратно-программной реализации. Предложенная декомпозиция обеспечивает возможность беспрепятственной работы пользователей различных уровней – от технологов и аналитиков до технических специалистов и разработчиков с данным вариантом оригинального модельного представления функциональной структуры.

7. Разработана *архитектура системы виртуализации*, позволяющая оперативно отображать синтезированную технологию управления КФС на аппаратную инфраструктуру туманных вычислений, отличающаяся высоким уровнем автоматизации процессов конфигурирования и реконфигурирования вычислительной среды и низким временем «переналадки» оборудования.

8. Разработаны методы и алгоритмы для *оценивания выполнимости производственных программ* судостроительной верфи (ССВ) для детерминированных сценариев изменения внешних воздействий, а также *оценивания показателей робастности и устойчивости производственных программ* ССВ для интервально заданных сценариев изменения внешних воздействий. На практическом примере показано, что благодаря высокому уровню абстракции применяемых в логико-динамических моделях концептов и их взаимосвязей можно один и тот же математический аппарат применять не только для раздельного моделирования сложных технологических и информационных процессов предприятия, но и совмещать описание этих процессов в рамках одной модели, что позволяет проводить их комплексное планирование, тем самым обеспечивая конструктивное согласование технологического и информационного уровней функционирования предприятия.

9. В результате выполненных исследований найдены *условия целесообразности использования* на практике разработанного модельно-алгоритмического и программного обеспечения решения задач синтеза технологий и оптимальных планов управления информационными процессами в промышленном интернете на основе туманных вычислений. Эти условия, в первую очередь, зависят от конкретных характеристик, степени унифицированности и связанности используемых вычислительных ресурсов, степени упорядоченности работ и операций, выполняемых с использованием КФС, а также характеристик передаваемых и обрабатываемых потоков данных и информации в промышленном интернете.

10. Разработанные методы организации вычислительных процессов на базе контейнерной виртуализации позволили на практике *реализовать глобально распределённую систему оперативного прогнозирования наводнений*, сочетающую в себе элементы технологических процессов, сложные многовариантные процессы обработки данных и технологии туманных вычислений, отличающуюся от традиционных систем с локальной диспетчеризацией задач тем, что управление информационными процессами осуществляется во взаимосвязи с целевым предназначением всей системы и её событийным контекстом.

Теоретическая значимость результатов, полученных в данной диссертации, состоит, во-первых, в разработке методологических и методических основ (концепций, принципов, подходов, моделей, методов и алгоритмов) автоматизации решения принципиально нового класса задач синтеза технологий и комплексных планов (программ) управления информационными процессами в КФС и в целом в промышленном интернете, обеспечивших повышение его производительности, и, во-вторых, в эффективной программно-технической реализации разработанной прикладной теории в различных предметных областях (космонавтика, промышленное производство, экология), подтвердившей научную обоснованность и правильность выбранной архитектуры созданной информационной платформы, обеспечившей успешное достижение поставленной цели диссертационных исследований.

Практическая значимость и реализация результатов, полученных в диссертации. Результаты, полученные в диссертационной работе, на практике привели к повышению эффективности (с точки зрения показателей оперативности, ресурсоемкости и стоимости) управления информационными процессами в промышленном интернете вещей за счёт рационального использования вычислительных ресурсов, обоснованного распределения вычислительных операций по разнородным узлам туманных вычислений и согласования уровня целей и задач системы в целом с уровнем планирования операций и распределения вычислительных ресурсов в ней. Кроме того, благодаря применению проактивного управления КФС удалось повысить робастность (и в более широком смысле – устойчивость) информационных процессов за счёт целенаправленного выбора тех технологий и комплексных планов управления КФС, которые наименее чувствительны к локальным и глобальным сбоям в работе информационно-управляющих и телекоммуникационных подсистем промышленного интернета.

Так, обобщая результаты многочисленных проведённых экспериментов, связанных с использованием разработанного математического и программного обеспечения синтеза технологий и программ управления информационными процессами в промышленном интернете, используемых в различных предметных областях, можно констатировать, что за счёт выполненной оптимизации в среднем показатель оперативности реализации синтезированного информационного процесса может быть повышен на 15%, а показатели ресурсоемкости и стоимости (в энергетическом или денежном выражении) – улучшены в среднем на 30% по сравнению со значениями аналогичных показателей, получаемых при использовании традиционных эвристических методов и алгоритмов решения задач календарного планирования и составления расписаний применительно к рассматриваемой предметной области.

Для упрощения и наглядности представления результатов, связанных с оцениваем устойчивости и робастности планов работы КФС, за показатель устойчивости реализации соответствующих планов управления информационными процессами была выбрана статистическая оценка вероятности недостижения заданных пороговых значений показателями качества функционирования КФС для фиксированных (оптимистических, пессимистических и средних) сценариев возникновения сбоев в информационно-управляющих и телекоммуникационных подсистемах промышленного интернета. Для интервально заданных возмущений при оценивании робастности планов управления информационными процессами в качестве показателя выбиралась величина площади пересечения аппроксимированной области достижимости, описывающей возможные варианты разброса значений показателей качества фиксированного плана, с областью, которая задает допустимые пороговые значения указанных показателей, определяемые экспертным путем. В этом случае применение предлагаемых методов и алгоритмов повышения устойчивости и робастности синтезированных технологий и комплексных планов функционирования КФС при решении практических задач позволяет повысить указанные показатели устойчивости и робастности в среднем на 30% по сравнению с показателями, полученными при использовании традиционных эвристических методов обеспечения устойчивости и робастности планов функционирования КФС.

При этом в ходе практической реализации диссертационных исследований были получены различные положительные эффекты в следующих конкретных предметных областях.

1. **Промышленное производство.** В акционерном обществе «Центр технологии судостроения и судоремонта» были внедрены методы и алгоритмы оценивания выполнимости, робастности и динамической устойчивости производственных программ судостроительного предприятия, которые позволили повысить обоснованность и оперативность принятия управленческих решений при формировании производственных планов.

2. **Космонавтика.** Для филиала акционерного общества «Государственный космический научно-производственный центр имени М.В. Хруничева» – Научно-исследовательского института космических систем имени А.А. Максимова были разработаны экспериментальные образцы общесистемного программного обеспечения (прототип сервисной шины) и специального программно-математического обеспечения решения задач планирования конфигурации и реконфигурации бортовой аппаратуры маломассогабаритного космического аппарата с целью перевода его из неработоспособного в работоспособное или частично работоспособное состояние в автоматическом и автоматизированном режиме. Также при выполнении проекта по заказу Федерального государственного унитарного предприятия «Конструкторское бюро "Арсенал"» имени М.В. Фрунзе проведено обоснование архитектуры системы комплексного моделирования транспортно-энергетического модуля для решения задач расчёта и анализа показателей его надёжности и живучести.

3. **Государственное управление.** В рамках научно-технического сотрудничества с Санкт-Петербургским государственным унитарным предприятием «Санкт-Петербургский информационно-аналитический центр» разработан модуль анализа и оптимизации вероятностно-временных характеристик Интегрированной системы информационно-аналитического обеспечения деятельности исполнительных органов государственной власти Санкт-Петербурга, с использованием которого была проведена оценка различных сценариев создания и развития указанной системы.

4. **Научная деятельность.** В Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Санкт-Петербургском институте информатики и автоматизации Российской академии наук (СПИИРАН) соискателем были получены новые научные и практические результаты в ходе выполнения следующих проектов: грант РНФ № 17-11-01254 «Методология и сервис-ориентированная технология создания и использования системы комплексного автоматизированного моделирования природных и природно-технологических объектов и ее реализация для оперативного прогнозирования речных наводнений», грант РФФИ № 15-08-08459 «Разработка и исследование моделей и методов комплексного адаптивного планирования работы системы управления сложными техническими объектами», грант РФФИ № 16-07-00779 «Разработка методологии и модельно-алгоритмического обеспечения проактивного управления структурной динамикой социо-кибер-физических систем», грант РФФИ № 17-08-00797 «Разработка и исследование методологических основ и технологии комплексного моделирования процессов функционирования системы проактивного управления сложными техническими объектами», грант РФФИ № 17-01-00139 «Разработка методологии структурирования и анализа свойств сложных технических систем». Результаты, полученные в перечисленных грантах, базируются на специальном модельно-алгоритмическом и программном обеспечении синтеза технологий и комплексных планов управления информационными процессами в КФС, разработанном в ходе выполненных диссертационных исследований. В частности, созданный программный комплекс широко использовался для верификации и валидации новых методов и экспериментальных образцов программных средств, созданных в ходе выполнения перечисленных грантов, и позволил обосновано предъявить требования к перспективным интеллектуальным технологиям, а также соответствующим архитектурам программных платформ, ориентированным на решение задач проактивного управления СОТО.

5. **Образовательная деятельность.** Результаты диссертации в части методологических и методических основ гарантированного проактивного управления критическими инфраструктурами в кризисных ситуациях, в том числе метод и алгоритм управления структурной динамикой сложных организационно-технических объектов, применялся в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Поволжский государственный

технологический университет» в исследовательской деятельности университета при выполнении НИР, проводимой по госзаданию Министерства образования и науки РФ №2.3135.2017/4.6. Также результаты диссертации использовались в учебном процессе университета при проведении занятий по дисциплине «Информационные технологии». Аналогично результаты диссертационных исследований были реализованы при проведении лекционных и практических занятий по дисциплинам «Поддержка жизненного цикла программного обеспечения (спецификация требований)», «Методология программной инженерии (спецификация требований)» в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения».

Практическая значимость полученных результатов подтверждена семью актами реализации, полученными в перечисленных выше организациях.

Положения, выносимые на защиту:

1. Полимодельное описание задач синтеза технологий и программ управления информационными процессами в промышленном интернете.

2. Комбинированные методы и алгоритмы совместного и раздельного решения задач синтеза технологий и планов управления информационными процессами в промышленном интернете.

3. Комбинированные методы и алгоритмы совместного и раздельного решения задач оценивания возможностей и обеспечения устойчивости проактивного управления информационными процессами в промышленном интернете.

4. Сервис-ориентированная архитектура, состав, структура и варианты функционирования программных комплексов синтеза технологий и планов управления информационными процессами в промышленном интернете.

5. Программный комплекс решения задач синтеза технологий и комплексных планов управления информационными процессами в промышленном интернете.

6. Технологии конфигурирования и использования программных комплексов решения задач синтеза технологий и комплексных планов управления информационными процессами в промышленном интернете при решении задач в области космонавтики, судостроения и экологии.

Достоверность и обоснованность научных положений, выводов и результатов подтверждается всесторонним анализом современного состояния исследований в предметной области, согласованностью результатов моделирования и проведенных расчетов с фактическими данными, полученными в процессе эксплуатации КФС, апробацией основных теоретических положений, полученных в диссертации, в печатных трудах, статьях и докладах на международных и всероссийских научно-практических конференциях и семинарах.

Апробация результатов исследований. Результаты диссертационной работы докладывались на межрегиональных, всероссийских, международных научно-технических конференциях, семинарах и симпозиумах, таких как: Международная научно-практическая конференция «Логистика: современные тенденции развития» (Санкт-Петербург, 2011), Российско-немецкая конференция «Гибкость и адаптивность глобальных цепей поставок» DR-LOG 2012 (Санкт-Петербург, 2012), Международная конференция «Проблемы управления и моделирования в сложных системах» (г. Самара, 2012, 2013, 2017), Шестая международная конференция «Управление развитие крупномасштабных систем MLSD'2012» (Москва, 2012), Европейская конференция по имитационному моделированию ECMS, (г. Кобленц, Германия, 2012, г. Алесунд, Норвегия, 2013, г. Варна, Болгария, 2015, г. Будапешт, Венгрия, 2017), Всероссийская научно-практическая конференция «Имитационное моделирование. Теория и практика» ИММОД (г. Казань, 2013), Европейская конференция по аэронавтике и космическим наукам EUCASS (г. Мюнхен, Германия, 2013), Международная конференция по морской логистике HMS (г. Бордо, Франция, 2014), Международная конференция по компьютерным технологиям в физике и инженерном деле ICSTPEA (Санкт-Петербург, 2014), Всероссийское совещание по проблемам управления ВСПУ (Москва, 2014), Международная конференция по прикладному моделированию I3M (г. Ларнака, Кипр, 2016), Международная он-лайн конференция по компьютерным наукам CSOC (2016, 2019), Белорусский космический конгресс (Минск, Белоруссия, 2017), Международная конференция по наукам о Земле и дистанционному зондированию Земли IGARSS (г. Валенсия, Испания, 2018).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 105 научных трудов, в том числе: 26 статей в изданиях, рекомендованных ВАК для опубликования основных результатов диссертаций на соискание ученой степени доктора технических наук, 5 патентов РФ, 5 свидетельств на программы; 38 статей зарегистрированы в SCOPUS, 19 статей зарегистрированы в Web of Science, остальные публикации – в научно-технических журналах и сборниках научных трудов.

Личный вклад автора в основных публикациях с соавторами кратко характеризуется следующим образом: в публикациях [4, 14, 39, 42] автору принадлежат новые способы учёта в логико-динамических моделях специфики операций, для которых введён запрет на прерывание выполнения; в работах [3, 10, 11, 21, 24, 26] в указанные модели был введён учёт факторов, связанной со структурной динамикой СОТО; в [5, 6, 9, 16, 22, 23, 38] представлен метод учёта складированных и нескладированных ресурсов; описание разработанного метода взаимодействия моделей управления операциями и потоками в условиях ликвидации прерывания операций приведены в [7, 15, 40, 41]. В серии публикаций [13, 17, 19, 28-35], посвящённых решению прикладных задач управления территорией, в том числе, в условиях чрезвычайных ситуаций, автором подробно изложены вопросы управления вычислительными и информационными процессами. Ранее разработанные логико-динамические модели, адаптированные автором применительно к соответствующим предметным областям, изложены в [8, 18, 20, 25, 27, 36, 37, 43, 44].

Структура и объём работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы и приложений, общим объемом 312 страниц, в том числе 255 источников литературы.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

В первой главе проведён анализ основных тенденций, связанных с созданием и развитием киберфизических систем и промышленного интернета.

История применения информационных систем в промышленности насчитывает уже более 50-ти лет. На начальном этапе их использования формируемые ими информационные потоки были фиксированными и незначительными, что не требовало решения проблемы эффективного управления данными системами. Ситуация стала стремительно меняться с появлением современных недорогих вычислительных устройств и сенсоров, которые способны взаимодействовать с физическим миром, выполнять вычисления и обмениваться информацией по стандартным интернет-протоколам (см. рисунок 1). Этот класс устройств сформировал новый уровень вычислительных ресурсов, способный выполнять часть функций верхнего уровня информационной системы, например, облачных вычислений, прямо на границе физического и кибернетического мира. Указанные изменения послужили основой для появления концепций КФС (ПрИ). В отличие от распространённого понятия «интернета вещей», в промышленном интернете информационные процессы представляют собой множество альтернативных способов реализации упорядоченного набора вычислительных операций, необходимых для организации и управления материальным производством. Кроме технических и технологических изменений новые концепции способствовали развитию клиент-ориентированного, мелкосерийного и гибкого производства. Важным отличием указанных производств от крупных поточных линий является непостоянство производственных процессов, а вместе с ним и динамика характеристик обеспечивающих их информационных процессов, значимость которых в новых условиях значительно возрастает. Для того чтобы сохранить возможность эффективно управлять таким производством, необходимо создать новую архитектуру, модели, методы и алгоритмы управления информационными процессами в промышленном интернете.

Согласно документу «Эталонная архитектура промышленного интернета», разработанному Консорциумом промышленного интернета в 2019 году, решаемые в диссертационной работе задачи управления информационно-вычислительными процессами занимают своё особое место среди функций, ориентированных на оптимизацию системы управления информационными процессами, на функциональном уровне промышленного интернета (см. рисунок 2).

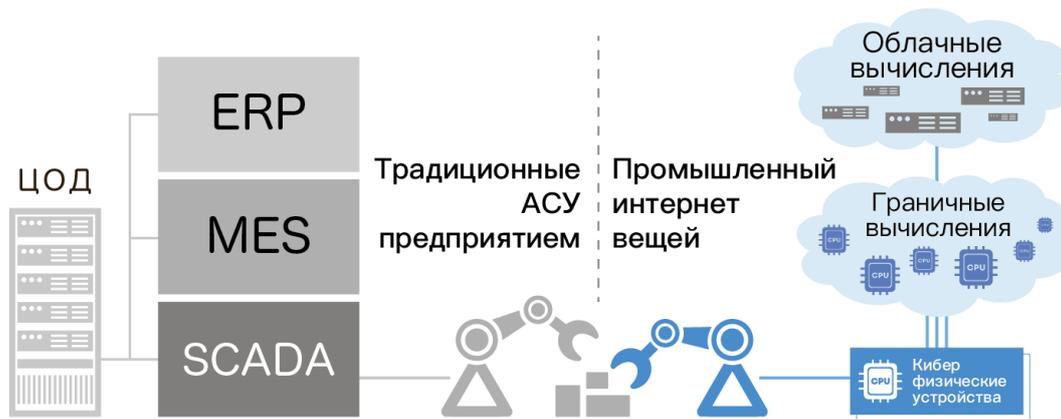


Рисунок 1. Архитектура АСУ предприятием разных поколений



Рисунок 2. Место задач управления информационными процессами в эталонной архитектуре промышленного интернета вещей

Ожидаемым ответом научного и инженерного сообщества на резкое возрастание сложности информационных систем явилось применение в них современных методов организации вычислений. В частности, перспективным направлением является распределение вычислительной нагрузки между всеми уровнями существующего интернета вещей: встроенными системами, средствами связи и облачными вычислительными ресурсами. Такой подход получил название «туманные вычисления» (fog computing). Существующие классические подходы к решению задач планирования вычислительных процессов напрямую не могут быть применены к туманным вычислениям в При, так как для них должен быть определён конкретный способ реализации информационного процесса. Но выбор указанного способа для заданных условий обстановки должен быть основан на знании характеристик операций, потоков и ресурсов, которые, опять же, зависят от выбираемого способа проведения вычислений. Для разрешения описанного противоречия на практике решают отдельные задачи управления информационными процессами в При, а именно, задачи планирования операций с фиксированной технологией и синтез технологии при фиксированном распределении задач по вычислительным ресурсам. С формальной точки зрения перечисленные задачи управления туманными вычислениями сводятся к задачам теории расписаний, подавляющее большинство которых являются NP-трудными. При этом даже классические приближенные полиномиальные эвристические алгоритмы построения расписаний при их использовании на практике для решения задач управления информационными процессами в При также оказываются трудно применимы из-за чрезвычайно большой размерности и ряда особенностей таких задач. Различные метаэвристические подходы, такие, например, как генетические и муравьиные алгоритмы, метод имитации отжига, базирующиеся на теории расписаний и комбинаторике, позволяют получить допустимый план вычислений, но не предоставляют информации об оценках степени отклонения полученных значений показателей качества конкретного плана от его возможных оптимальных значений. Поэтому для удовлетворения

возникшей практической потребности в решении перечисленных выше задач синтеза технологий и планов управления информационными процессами в При в диссертационной работе было предложено провести их системно-кибернетическую интерпретацию на основе ранее предложенной концепции проактивного управляемой структурной динамикой сложных технических объектов (СТО). Данная интерпретация позволила для решения классических задач календарного планирования и составления расписаний применительно к КФС (При), имеющих дискретно-событийный характер, привлечь на конструктивном уровне достаточно мощный и разнообразный математический аппарат современной теории оптимального управления СТО и СТО с перестраиваемой структурой. На рисунке 3 показано место разработанных (модифицированных) в диссертации методов и алгоритмов решения задач оптимального программного управления КФС, к которым были сведены исходные задачи синтеза технологий и комплексных планов управления информационными процессами в указанных системах.

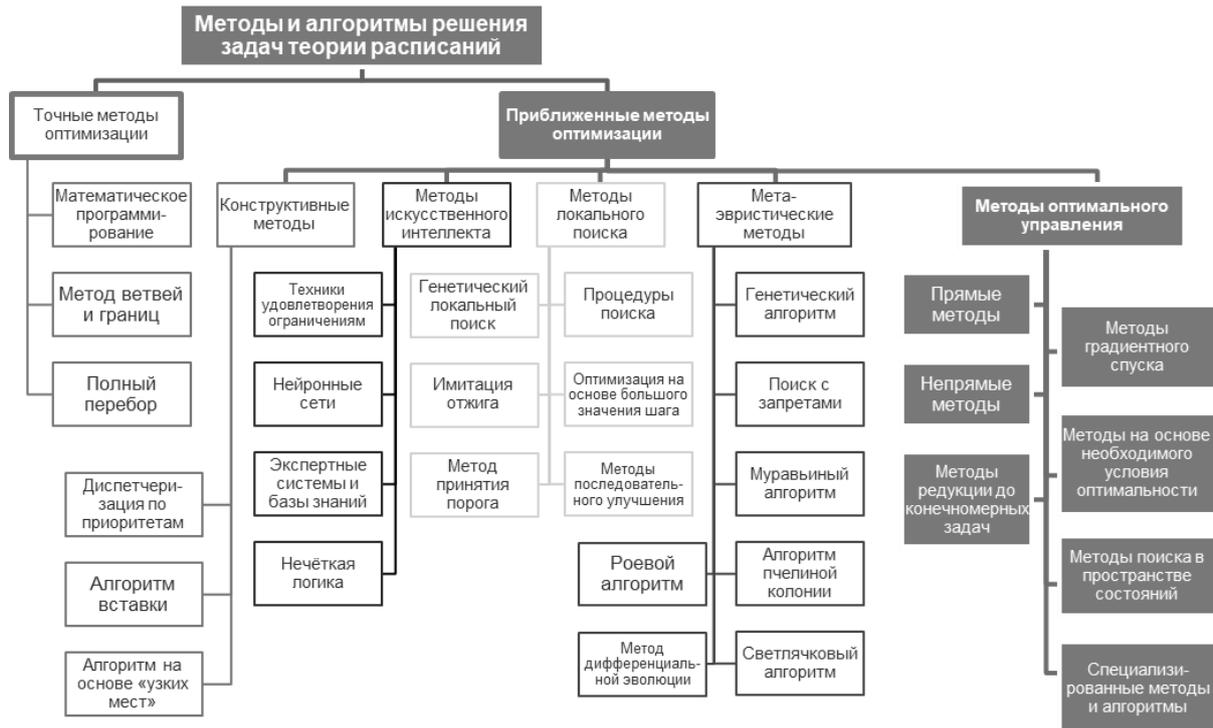


Рисунок 3. Методы и алгоритмы решения задач теории расписаний

Суть предложенной системно-кибернетической интерпретации сводится к следующему. Известно, что обобщённая задача выбора (синтеза) структур СТО сводится к постановке и решению оптимизационной задачи:

$$\bar{S}\{[f \in \bar{F}(\bar{\pi})]\bar{R}[\bar{m} \in \bar{M}]\} \rightarrow extr, \bar{\pi} \in \bar{P}, \bar{f} \in \bar{F}(\bar{\pi}), \bar{m} \in \bar{M},$$

где \bar{P} – множество возможных алгоритмов управления $\bar{\pi} \in \bar{P}$; \bar{F} – множество взаимосвязанных выполняемых системой функций (алгоритмов, операций); \bar{M} – множество элементов СТО; \bar{R} – операция отображения элементов множества \bar{F} на элементы множества \bar{M} , которое на конструктивном уровне, в общем случае, описывается полимодельным комплексом. Данное оптимальное отображение должно обеспечивать экстремум некоторой целевой функции \bar{S} (либо обобщенной целевой функции, полученной в результате свертки частных целевых функций) при соблюдении заданных ограничений. К сожалению, в рамках данного описания никак не учитывалась объективно существующая структурная динамика СТО.

Поэтому для формальной постановки и описания перечисленных выше задач многокритериального структурно-функционального синтеза и управления функционированием и развитием КФС (При) в условиях возмущающих воздействий была предложена их следующая системно-кибернетическая формулировка: необходимо разработать принципы, подходы, модели, методы, алгоритмы, а также соответствующее программное обеспечение, позволяющие синтезировать такие технологии и программы управления информационными процессами в КФС

(При), а также технологии управления реализацией указанных программ $\langle U^t, S_\delta^{*t_f} \rangle$, при которых выполняются следующие условия и ограничения:

$$J_\theta \left(X_\chi^t, \Gamma_\chi^t, Z_\chi^t, F_{\langle \chi, \chi' \rangle}^t, \Pi_{(\tilde{\delta}, \tilde{\delta})}^t, t \in (t_0, t_f] \right) \rightarrow \begin{matrix} \text{extr} \\ \langle U^t, S_\delta^{*t_f} \rangle \in \Delta_g \end{matrix},$$

$$\Delta_g = \left\{ \langle U^t, S_\delta^{*t_f} \rangle \mid R_\beta \left(X_\chi^t, \Gamma_\chi^t, Z_\chi^t, F_{\langle \chi, \chi' \rangle}^t, \Pi_{(\tilde{\delta}, \tilde{\delta})}^t \right) \leq \tilde{R}_g; U^t = \Pi_{\langle \delta_1, \delta_2 \rangle}^{t_1} \circ \Pi_{\langle \delta_2, \delta_3 \rangle}^{t_2} \circ \Pi_{\langle \tilde{\delta}, \delta \rangle}^{t_2}; \chi \in B \right\}$$

где χ – индекс, характеризующий различные типы структур промышленного интернета, $\chi \in \{\text{Топ, Фун, Тех, ПМО, ИО}\}$ – множество индексов, соответствующих топологической (Топ), функциональной (Фун) и технической (Тех) структурам, структурам программно-математического и информационного обеспечения (ПМО, ИО), $t \in T$ – множество моментов времени; $X_\chi^t = \{x_{\chi l}^t, l \in L_\chi\}$ – множество элементов, входящих в состав структуры динамического альтернативного мультиграфа G_χ^t , описывающего управляемую структурную динамику КФС (При); $\Gamma_\chi^t = \{Y_{\langle \chi, l, l' \rangle}^t, l, l' \in L_\chi\}$ – множество дуг мультиграфа 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 мультиграфа. $F_{\langle \chi, \chi' \rangle}^t$ – отображения различных структур КФС и При друг на друга в момент времени t , $\Pi_{\langle \tilde{\delta}, \tilde{\delta} \rangle}^t$ – операция композиции многоструктурных макросостояний с номерами $\tilde{\delta}, \tilde{\delta}$ в момент времени t (подробное конструктивное описание данных состояний проводится с использованием соответствующих моделей, представленных во второй главе диссертации); U^t – управляющие воздействия, позволяющие синтезировать как структуры КФС (При), так и процессы их функционирования; J_θ – стоимостные, временные, ресурсные показатели, характеризующие качество функционирования КФС (При), $q \in Q = \{1, \dots, l\}$ – множество номеров показателей; Δ_g – множество динамических альтернатив (множество структур и параметров промышленного интернета, множество программ его функционирования); B – множество номеров пространственно-временных, технических и технологических ограничений, определяющих реализацию вычислительных процессов; \tilde{R}_g – заданные величины; $T = (t_0, t_f]$ – интервал времени, на котором синтезируются технологии и планы реализации информационных процессов.

Предложенное обобщенное формальное описание проблемы управления структурной динамикой КФС (При) позволило с единых методологических, методических и технологических позиций подойти к анализу и обоснованному выбору путей решения уже конкретных классов задач синтеза технологий и программ управления информационными процессами в промышленном интернете, которые были получены в результате декомпозиции исходной проблемы и являются основными объектами исследования в рассматриваемой диссертации.

На рисунке 4 в наглядном виде представлена суть и обобщенные этапы решения исследуемой в диссертационной работе проблемы. В ее последующих главах описаны детально данные этапы.

Во второй главе дано описание разработанного полимодельного комплекса, состоящего из конкретных аналитико-имитационных логико-динамических моделей, описывающих различные аспекты управляемой структурной динамики КФС (При).

В разработанный полимодельный комплекс входят динамические модели управления: движением, операциями, каналами, ресурсами, потоками, параметрами операций, структурной динамикой и вспомогательными операциями. Основными из них являются модели программного управления (планирования) операциями, ресурсами и потоками в силу того, что все остальные модели содержат их параметры в своём составе. В диссертационной работе представлено полное описание полимодельного комплекса, а ниже приведём лишь пример указанных моделей в упрощённом наглядном виде.

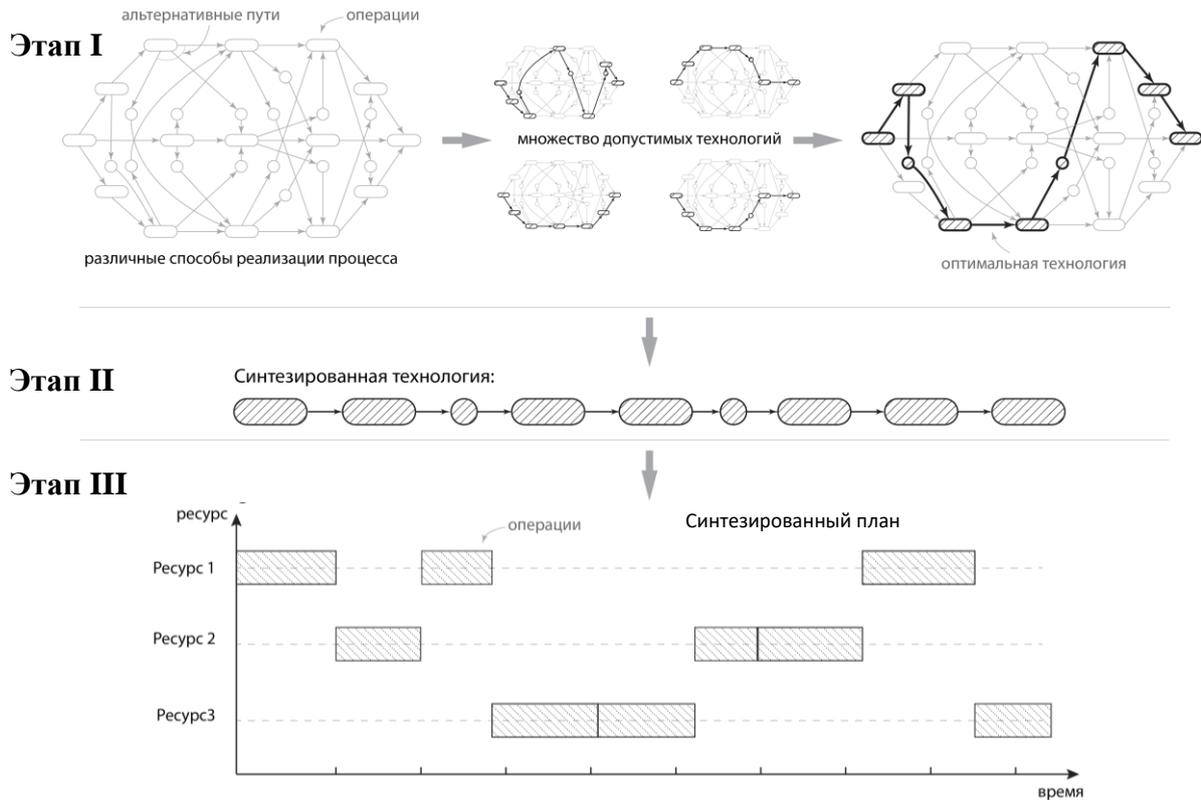


Рисунок 4. Графическая интерпретация этапов решения проблемы синтеза структуры и планов управления информационными процессами в ПриИ

Логико-динамическая модель управления операциями имеет следующий вид:

$$\dot{x}_{ik}^{(o,1)} = \sum_{j=1}^m \varepsilon_{ij}(t) \theta_{ikj} u_{ikj}^{(o,1)}(t), \quad i = 1, \dots, n; \kappa = 1, \dots, S_i; j = 1, \dots, m,$$

где $x_{ik}^{(o,1)}(t)$ – переменная, характеризующая состояние выполнения операции D_{κ}^i в ходе реализации процесса A_i ; $u_{ikj}^{(o,1)}(t)$ – управляющее воздействие, при этом $u_{ikj}^{(o,1)}(t) = 1$, если операция D_{κ}^i выполняется при решении задачи A_i с использованием соответствующего ресурса B_j , $u_{ikj}^{(o,1)}(t) = 0$ – в противоположном случае, $\varepsilon_{ij}(t)$ – матричная временная функция, задающая пространственно-временные ограничения, θ_{ikj} – матричная временная функция, которая характеризует технические возможности ресурса по реализации задач.

Одно из наиболее важных ограничений модели:

$$\sum_{j=1}^m u_{ikj}^{(o,1)} \left[\sum_{\tilde{\alpha} \in \Gamma_{ik1}} (a_{i\tilde{\alpha}}^{(o,1)} - x_{i\tilde{\alpha}}^{(o,1)}(t)) + \prod_{\tilde{\beta} \in \Gamma_{ik2}} (a_{i\tilde{\beta}}^{(o,1)} - x_{i\tilde{\beta}}^{(o,1)}(t)) \right] = 0,$$

где $a_{i\tilde{\alpha}}^{(o,1)}$, $a_{i\tilde{\beta}}^{(o,1)}$, $a_{S_i}^{(o,1)}$, $a_{S_i}^{(п,1)}$, $a_{jS_i}^{(o,1)}$ – заданные величины (краевые условия), значения которых должны принять соответствующие переменные $x_{i\tilde{\alpha}}^{(o,1)}(t)$, $x_{i\tilde{\beta}}^{(o,1)}(t)$, $x_{S_i}^{(o,1)}$, $x_{S_i}^{(п,1)}$, $x_{jS_i}^{(o,1)}$ в конце интервала планирования операций КФС в момент времени $t = t_f$, Γ_{ik1} , Γ_{ik2} – множество номеров операций взаимодействия, проводимых с объектом B_j , непосредственно предшествующих и технологически связанных с операцией D_{κ}^i с помощью логических операций «И», «ИЛИ» (либо «альтернативное ИЛИ») соответственно. Именно эти ограничения позволяют при синтезе конкретных технологий и комплексных планов управления информационными процессами в КФС (ПриИ) учитывать возможные альтернативные варианты реализации указанных процессов.

С помощью показателя качества вида $J_0 = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \left[\sum_{\kappa=1}^{S_i} (a_{ik}^{(o,1)} - x_{ik}^{(o,1)}(t_f))^2 \right]$, где $a_{ik}^{(o,1)}$ – краевые условия, оценивается полнота выполнения операций на заданном интервале планирования.

Динамическая модель управления потоками имеет следующий вид (упрощённо):

$$\dot{x}_{ikj}^{(n,1)} = u_{ikj}^{(n,1)}(t);$$

где $x_{ikj}^{(n,1)}(t)$ – переменная, характеризующая объём обработанной (а также принятой, переданной) информации; $u_{ikj}^{(n,1)}(t)$ – интенсивность обработки информации.

Одно из основных ограничений данной модели следующее: $0 \leq u_{ikj}^{(n,1)}(t) \leq C_{ikj}^{(n,1)} u_{ikj}^{(o,1)}$, где $C_{ikj}^{(n,1)}$ – заданная константа, характеризующая максимально возможное значение интенсивности обработки (а также приёма и передачи) информации $u_{ikj}^{(n,1)}(t)$. На примере этого ограничения видна взаимосвязь модели программного управления операциями с моделью управления потоками через управление $u_{ikj}^{(o,1)}$.

Аналогично модели управления операциями в данной модели используется показатель качества вида $J_{\Pi} = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \left[\sum_{k=1}^{S_i} \sum_{j=1}^m \left(a_{ik}^{(n,1)} - x_{ikj}^{(n,1)}(t_f) \right)^2 \right]$, где $a_{ik}^{(n,1)}$ – краевые условия, с помощью которого оценивается полнота обработки (приёма, передачи) информационного потока на заданном интервале планирования.

В целом построенная обобщённая модель представляет из себя детерминированную нелинейную нестационарную конечномерную дифференциальную динамическую систему большой размерности с перестраиваемой структурой.

Взаимосвязь моделей (M_o – управления операциями, M_k – каналами, M_p – ресурсами, M_{Π} – потоками, M_e – параметрами операций, M_c – структурной динамикой, M_b – вспомогательными операциями, M_d – движением), входящих в состав обобщённой модели M , через их параметры, компоненты векторов состояния и управляющих воздействий, представлена на рисунке 5.

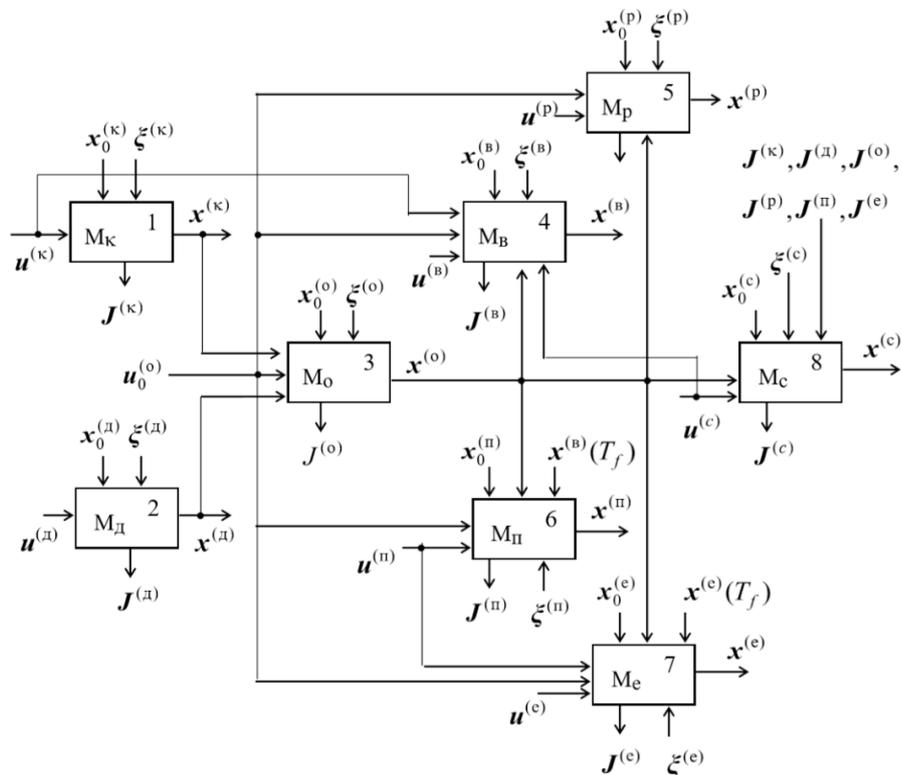


Рисунок 5. Взаимосвязь частных моделей, входящих в состав обобщённой модели УСД КФС

В целом предложенная в диссертации динамическая интерпретация процессов управления элементами и подсистемами При в виде описанного выше полимодельного комплекса позволяет, как показали проведенные исследования: широко использовать при решении как задач синтеза технологий функционирования КФС, так и задач комплексного планирования информационных процессов При, фундаментальные научные результаты, полученные к настоящему времени в современной теории управления сложными динамическими системами с перестраиваемой структурой; существенно сократить размерность указанных задач программного управления (за

счет рекуррентного описания моделей), декомпозировать и распараллеливать исходные задачи планирования и управления КФС и повысить оперативность решения исследуемых задач при использовании современных многопроцессорных и многоядерных ЭВМ; повысить устойчивость вычислительного процесса, связанного с решением задач планирования и управления КФС, за счёт возможности реализации разработанных автором алгоритмов выбора и оптимизации на динамических моделях в виде набора самостоятельных вычислительных моделей.

В третьей главе показано как, используя предложенные в диссертации концепции комплексного (системного) моделирования и проактивного управления СТО, можно решить сформулированные задачи синтеза технологий и комплексных планов управления информационными процессами в КФС (При).

Для этого была разработана соответствующая многоэтапная процедура решения задач многокритериального динамического структурно-функционального синтеза СТО, к которым были сведены исходные задачи диссертационного исследования. Обобщенное содержание данных этапов состоит в следующем.

Этап 1. В интерактивном режиме осуществляется автоматизированная подготовка, контроль, анализ и ввод всей исходной информации, необходимой для решения задачи управления структурной динамикой КФС (При). При этом одновременно проводится адаптация параметров и структур ранее построенных моделей, алгоритмов и соответствующих вычислительных модулей специального программно-математического и информационного обеспечения (СПМО и ИО) разработанного программного комплекса, представляющего собой пример так называемой имитационной системы (ИмС), к прошлому и текущему состоянию внешней среды, объектов управления (ОУ) и управляющих подсистем (УП), входящих в состав функционирующей и синтезируемой КФС (При). При отсутствии требуемых исходных данных происходит либо их генерация с использованием соответствующих имитационных моделей, входящих в состав ИмС, либо на основе экспертного опроса.

Этап 2. Планирование проведения комплексного моделирования процессов адаптивного управления функционированием и развитием КФС (При) в текущей и прогнозируемой обстановке, планирование проведения вычислительных экспериментов в ИмС, определение состава и структуры моделей, методов и алгоритмов решения частных задач моделирования, синтеза технологий и планов, расчёт времени, необходимого для решения указанных задач.

Этап 3. Генерирование, на основе проведения комплексного моделирования, допустимых вариантов функционирования КФС (При) в исходном, промежуточных и требуемых многоструктурных макросостояниях, вывод результатов моделирования ЛПР, предварительный интерактивный структурно-функциональный анализ указанных результатов моделирования.

На данном этапе также осуществляется анализ показателей целевых и информационно-технологических возможностей (Ц и ИТВ) системы управления (СУ) КФС. Для сформированных на предыдущем шаге логико-динамических моделей (ЛДМ) синтеза технологий и комплексных планов функционирования системы управления КФС проводится построение соответствующих им множеств достижимости и их аппроксимация. На рисунке 6 приведен пример графического изображения множества достижимости (области достижимости) в пространстве двух показателей качества, характеризующих функционирование КФС. На данном рисунке приняты следующие обозначения: $D_j^{(\xi)}(T_f, T_0, X_0, \Xi, \mathbf{u}_i)$ – область достижимости КФС (либо ее аппроксимация) в пространстве ее показателей качества, $\mathbf{u}_i(t)$, $t \in (T_0, T_f]$, $i = 1, \dots, n$ – соответственно программа управления (синтезированный комплексный план и технология управления информационными процессами) в рамках того или иного сценария воздействия внешней среды на КФС ($\xi_j(t)$, $t \in (T_0, T_f]$, $j = 1, \dots, m$), $t \in (T_0, T_f]$ – текущий момент времени, интервал времени, на котором осуществляется управление КФС, определяемый T_0 начальным и конечным T_f моментами времени. Знание данного множества, по существу, заменяет собой всю необходимую для решения задач управления КФС информацию о динамике данной системы, её основных ограничениях. В этом случае прогнозируемые многоструктурные макросостояния КФС, в которых она может оказаться, а также значений ее показателей Ц и ИТВ получаются в результате проектирования множества достижимости ЛДМ (либо его аппроксимации) на соответствующие оси декартовой (полярной) системы координат в пространстве состояний, либо в пространстве целевых (критериальных)

функций (в пространстве выходов ЛДМ). Располагая множеством достижимости (МД), можно проанализировать как зависит разрешимость задач синтеза технологий и комплексных планов управления информационными процессами в КФС от структуры и свойств множества начальных состояний, конечных состояний КФС и ЛДМ, описывающих функционирование КФС, от интервалов времени, на котором происходит управление КФС, от состава и структуры пространственно-временных, технических и технологических ограничений.

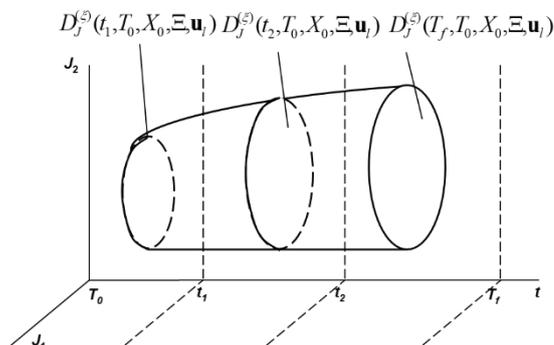


Рисунок 6. Пример графического изображения множества достижимости (области достижимости) в пространстве двух показателей качества для трёх моментов времени

Кроме того, знание заранее рассчитанных (для возможных сценариев изменения возмущающих воздействий) множеств достижимости в пространстве их системотехнических параметров значительно повышает оперативность оценивания выполнимости соответствующих пространственно-временных, технических и технологических ограничений в исследуемых задачах синтеза технологий и комплексных планов управления информационными процессами в КФС, что, в свою очередь, позволяет своевременно скорректировать (дополнить) состав и структуру используемых в данных системах ресурсов.

Этап 4. Автоматизированный ввод допустимых вариантов функционирования КФС (При), проверка корректности заданной системы ограничений, окончательный выбор необходимого уровня агрегирования при описании моделей УСД КФС (При), вычислительной схемы и плана вычислительных экспериментов по поиску оптимальных программ УСД КФС (При).

Этап 5. Поиск оптимальных программ управления структурной динамикой КФС (При), при которых обеспечивался переход из заданного в синтезируемое многоструктурное макросостояние КФС (При), робастное (устойчивое) управление функционированием КФС (При) в промежуточных многоструктурных макросостояниях.

На данном этапе решения исследуемых в диссертации задач, с использованием разработанных комбинированных методов планирования операций и распределения ресурсов дискретная по своей «природе» исходная задача синтеза технологий и программ управления информационными процессами в КФС, традиционно решаемая методами календарного планирования и теории расписаний, преобразуется в задачу неклассического вариационного исчисления, которая, в свою очередь, сводится к нелинейной краевой задаче с помощью метода локальных сечений, разработанного Болтянским В.Г, реализующего принцип максимума Понтрягина Л.С в задачах оптимального управления динамическими системами для случая задания смешанных ограничений.

Для численного решения рассматриваемых двухточечных краевых задач с закреплённым левым и правым концом фазовой траектории и фиксированном интервалом времени в диссертации предложено использовать методы Ньютона и различные его модификации, методы штрафных функционалов, градиентные методы, метод последовательных приближений в сочетании с методом ветвей и границ, обладающие каждый своими особенностями применения. Проведенные исследования показали, что при комбинированном использовании перечисленных методов происходит взаимная компенсация имеющихся ограничений и недостатков каждого из них. Поэтому поиск решения в задачах выбора оптимальных технологий и программ УСД КФС в диссертации проводился в два этапа: поиск решения задачи УСД КФС и начальных значений сопряжённых переменных при отсутствии жёстких ограничений на значения краевых условий в

конечный момент времени, а затем, используя полученные приближенные начальные условия для сопряженной системы уравнений и один из перечисленных выше методов и их комбинаций, проводился поиск решения исходной задачи выбора оптимальных технологий и программ УСД КФС для фиксированных краевых условий в основной системе уравнений, описывающих функционирование данной системы. В ходе решения перечисленных задач также проводился многокритериальный выбор наиболее предпочтительных технологий и программ УСД КФС. Для этого в диссертации предложено использовать (в зависимости от складывающейся обстановки, имеющегося времени и исходных данных) два основных подхода.

В рамках первого подхода предлагается осуществлять в автоматическом либо интерактивном режиме последовательное сужение множества допустимых альтернатив (оптимальных технологий и планов) $Q(x) \supseteq Q_{(1)}(x) \supseteq Q_{(2)}(x) \supseteq \dots \supseteq Q_{I_M}(x)$, где I_M – количество анализируемых отношений предпочтения, задаваемых с помощью соответствующих критериальных функций, оценивающих качество синтеза технологий и комплексных планов функционирования СУ КФС. Конструктивно данный переход реализовывался путем задания дополнительных изопериметрических условий, обеспечивающих не ухудшение значений последовательно оптимизируемых показателей качества функционирования СУ КФС.

Второй подход к решению задач многокритериального выбора основан на построении и оптимизации обобщенной критериальной функции $I_{сб}$ (обобщенного показателя эффективности), оценивающей потенциальную эффективность функционирования СУ информационными процессами в КФС на интервале планирования. При этом, если при поиске оптимального программного управления элементами и подсистемами СУ информационными процессами в КФС известна явная зависимость обобщенного показателя эффективности применения СУ КФС $I_{сб}$ от частных показателей качества планирования следующего вида: $I_{сб} = \sum_{i=1}^{I_M} J_i \lambda_i$, где $\lambda_i \geq 0$, $\sum_{i=1}^{I_M} \lambda_i = 1$, то исходная задача векторной оптимизации сводится к обычной однокритериальной задаче программного управления КФС. Данная задача может быть решена с помощью перечисленных выше методов численного решения задач оптимального управления.

Однако, следует подчеркнуть, что процедура нахождения данных коэффициентов представляет из себя весьма сложную проблему. Поэтому в диссертации была предложена и программно реализована задача многокритериального выбора с использованием аналитико-имитационного моделирования. В основу данной постановки задачи положена гипотеза о том, что экстремум по исходному (глобальному внешнему) показателю эффективности (ПЭ) функционирования КФС достигается в одной из точек множества Парето, определяемых при оптимизации управления КФС по частным показателям качества (ПК), выявленных в результате неформальной декомпозиции исходной задачи синтеза. Ранее выполненные исследования (см. работы П.С. Краснощекова и др.) показали, что данная гипотеза выполняется в тех случаях, когда имеет место монотонная зависимость, при которой значения ПЭ не убывают, если не убывают значения частных ПК. В диссертации показано, что в рамках разработанных логико-динамических моделей управления КФС указанное свойство монотонности выполняется. Реализация предложенной процедуры многокритериального выбора выполнялась в два этапа. На первом этапе для фиксированных весовых коэффициентов в описанной выше свертке частных показателей с использованием аналитических ЛДМ УСД КФС осуществлялся синтез технологий и программ управления, которые на втором этапе фиксировались в имитационной модели, описывающей функционирование КФС в условиях заданных сценариев реализации возмущающих воздействий. При этом на втором этапе уже осуществлялся поиск значений наилучших значений весовых коэффициентов, оптимизирующих неявно заданную целевую функцию (ПЭ), оценивающую качество функционирования КФС. Для этого использовались методы близкие по своему содержанию к методам теории планирования экспериментов. Кроме того, наряду со значениями ПЭ, ПК функционирования КФС, вычислялись значения показателей устойчивости реализации программ управления КФС.

Этап 6. Оценивание робастности (нечувствительности к интервально заданным возмущающим воздействиям) синтезированных технологий и программ управления КФС.

В случае интервального задания исходных данных при оценивании робастности синтезированных технологий и программ управления КФС использовался тот же подход, что и на описанном выше этапе анализа целевых и информационно-технологических возможностей системы управления КФС, который базируется на построении и исследовании областей достижимости, но уже в условиях возмущающих воздействий. Заданной области возмущающих воздействий соответствует область возможных значений фазовых переменных, описывающих состояние КФС. Этой области соответствует область в пространстве значений показателей качества функционирования КФС. Для наглядности на рисунке приведена область достижимости D для двух компонентов векторного показателя качества: результативности (J_1) и ресурсоёмкости (J_2) процесса функционирования КФС, а также заданы допустимые границы изменений значений данных показателей J_{a1} , J_{b1} , J_{a2} , J_{b2} . Подробное описание обозначений на рисунке приведено в диссертационной работе.

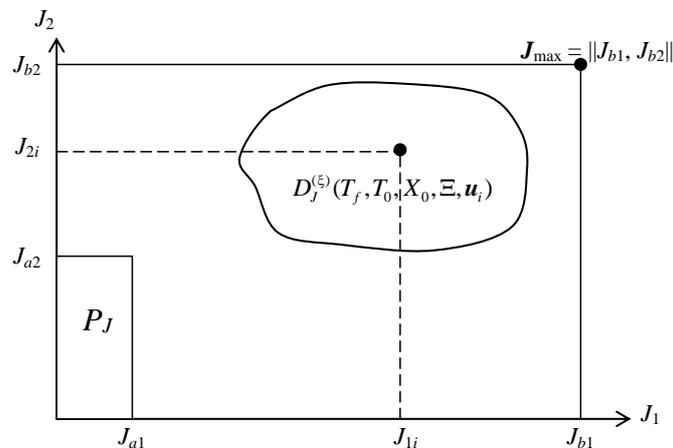


Рисунок 7. Область достижимости КФС для сокращённого вектора показателей эффективности и устойчивости

В ходе выполненных исследований было установлено, что если для некоторого фиксированной технологии и плана управления информационными процессами в КФС, подверженных влиянию возмущающих воздействий область достижимости для указанной системы находится вне заданных допустимых границ, то эти технологии и план функционирования КФС нечувствительны к воздействию данных возмущений.

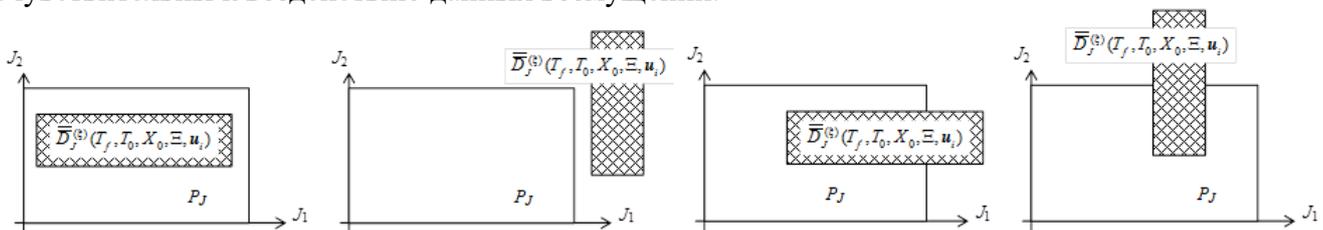


Рисунок 8. Возможные варианты расположения областей достижимости ЛДМ КФС

Окончательный выбор наиболее робастных технологий и программ управления КФС в этом случае целесообразно проводить, исходя из следующего условия:

$$S_j(\mathbf{u}_i(t)) = \min_{1 \leq i \leq n} \max_{1 \leq j \leq m} S_j(\mathbf{u}_i(t)),$$

где $S_i(\mathbf{u}_i(t))$ – площадь пересечения областей $\overline{D}_J^{(\xi)}(T_f, T_0, X_0, \Xi, \mathbf{u}_i)$ и P_J (область, границы которой задаются экспертами, на основе требований, предъявляемых к качеству планирования), n – общее количество анализируемых планов применения КФС; m – общее количество сценариев, описывающих интервально-заданные возмущающие воздействия на КФС.

Этап 7. Структурная и параметрическая адаптация плана, СПМО и ИО ИС к возможным (прогнозируемым на имитационных моделях) состояниям объекта управления (ОУ), управляющей подсистемы (УП), внешней среды. В ходе указанной адаптации, кроме того, вводится необходимый уровень структурной избыточности КФС (При), обеспечивающий на этапе реализации плана компенсацию не предусмотренных в плане возмущающих воздействий.

После проведения требуемого числа вычислительных экспериментов осуществляется оценивание устойчивости сформированного адаптивного плана УСД КФС (При).

Этап 8. Вывод полученных результатов комплексного адаптивного планирования применения КФС (При), их интерпретация и коррекция ЛПР,

Одно из главных достоинств предлагаемого метода поиска оптимальных программ УСД КФС (При) состоит в том, что в ходе формирования вектора программных управлений в финальный момент времени, наряду с синтезируемой технологией и оптимальным планом, одновременно получается и то искомое многоструктурное макросостояние, находясь в котором КФС (При) сможет выполнять поставленные перед ней задачи в складывающейся (прогнозируемой) обстановке с требуемой степенью устойчивости.

В таблице 1 показано, каким образом фундаментальные научные результаты, полученные в классической качественной теории управления сложными объектами (СЛО) могут на конструктивном уровне использоваться при решении различных классов прикладных задач управления КФС. Данная таблица иллюстрирует те преимущества, которые получаются при использовании предложенной системно-кибернетической интерпретации задач, исследуемых в диссертации, по сравнению с традиционными подходами, базирующимися на результатах, полученных в исследовании операций и имитационном моделировании.

Таблица 1 – Прикладная интерпретация фундаментальных научных результатов

Основные результаты, полученные в классической теории управления СЛО	Предлагаемая прикладная интерпретация ранее полученных фундаментальных научных результатов
Анализ существования решений в задачах УСД СЛО	Проверка адекватности описания процессов управления КФС с использованием предложенных логико-динамических моделей
Условия управляемости и достижимости в задачах УСД СЛО	Проверка реализуемости технологий управления КФС на интервале управления, выявления основных факторов, влияющих на целевые и информационно-технологические возможности КФС
Условия единственности оптимальных программ управления в задачах планирования применения СЛО	Оценка возможности получения оптимальных планов применения КФС
Необходимые и достаточные условия оптимальности в задачах УСД СЛО	Предварительный анализ структуры оптимальных программ управления КФС
Условия устойчивости и чувствительности в задачах УСД СЛО	Оценивание устойчивости (чувствительности) УСД КФС к возмущающим воздействиям, к изменению состава и структуры исходных данных

В четвертой главе описана процедура обоснованного выбора архитектуры разработанного программного комплекса на основе использования комбинированного метода многокритериального принятия решений. Необходимость проведения такого выбора обусловлена тем, что традиционно разработчиками используется либо самая современная архитектура, либо та, которая им хорошо знакома. При этом нет гарантии, что тот или иной вариант обеспечит эффективное функционирование разрабатываемой информационной системе. В результате реализации предложенной процедуры, в основу которой были положены методы обработки экспертных знаний, базирующиеся на нечетко-возможностном подходе и теории планирования экспериментов, была выбрана сервис-ориентированная архитектура как наиболее предпочтительная по сравнению с другими известными архитектурами. При этом в ходе указанного многокритериального выбора в качестве частных показателей, оценивающих качество данных

архитектур, рассматривались показатели модульности, допустимой гетерогенности, производительности, многопользовательского режима и масштабируемости

В результате выполненных исследований, было предложено реализовать в рамках разрабатываемого программного комплекса ряд вычислительных сервисов с помощью следующих программных модулей: аналитического модуля одновременного синтеза технологий и программ управления информационными процессами в КФС; аналитического модуля учёта факторов неопределённости, предназначенный для оценивания робастности и устойчивости планов функционирования КФС на основе построения областей достижимости; имитационного программного модуля для решения задач синтеза технических характеристик узлов КФС.

При проектировании вычислительных модулей были сформулированы и соблюдены требования, предъявляемые к процессу разработки и соответствующим инструментальным средствам и состоящие в необходимости использования передовых достижений в области программирования, обеспечения открытости межмашинного взаимодействия, сокращения сроков разработки и коррекции программного кода, взаимозаменяемости разработчиков, наглядности и удобства взаимодействия с различными категориями пользователей. В результате реализации перечисленных требований в технологическую основу комплекса были положены: язык программирования Python, библиотека «решателей» научных задач SciPy, стандарты создания веб-служб W3C Services, программный каркас для создания пользовательского интерфейса React, средство для создания интерактивного представления научных данных ECharts, сервисная шина WSO2, язык разметки XML (eXtensible Markup Language, расширяемый язык разметки) для хранения исходных данных и результатов. Важно отметить, что все сторонние компоненты, используемые в разработанном программном комплексе, являются свободно распространяемым программным обеспечением и не требуют каких-либо лицензионных отчислений.

В результате выполненных исследований было установлено, что работа с центральным аналитическим модулем требует ввода большого количества исходных данных о вычислительных процессах, операциях и ресурсах, что вынуждает применять средства автоматизации моделирования, в частности, средства описания процессов функционирования рассматриваемых в диссертации классов сложных объектов. Проведённый анализ многочисленных стандартов, инструментальных средств и сред автоматизации моделирования показал, что широко используемый на практике язык BPMN является удобным и в то же время формально закреплённым в стандарте средством, позволяющим с одной стороны оперировать графическими примитивами для описания процессов в КФС, а с другой стороны формировать соответствующий XML документ для его последующей автоматизированной обработки. Кроме того, существующие в стандарте BPMN средства расширения языка позволили использовать его для описания всех концептов, применяемых в разработанных логико-динамических моделях. В итоге задача автоматизации формирования исходных данных в диссертации была успешно решена с использованием стороннего программного обеспечения, позволяющего пользователю графически в интерактивном режиме задавать исходные данные в стандартизированном виде, а также использовать уже готовые описания исследуемых информационных процессов в формате BPMN, дополняя их необходимыми атрибутами. Таким образом, разработанный центральный аналитический модуль предоставляет сервис решения задачи синтеза технологий и комплексных планов управления информационными процессами.

Второй разработанный в рамках выполненных диссертационных исследований аналитический программный модуль предоставляет сервис оценивания робастности планов функционирования КФС в условиях воздействия на них интервально заданных возмущающих воздействий на основе построения и исследования аппроксимированных областей достижимости соответствующих логико-динамических моделей КФС в пространстве показателей, оценивающих качество их функционирования. Совместное применение двух указанных аналитических сервисов позволяет на практике находить варианты технологий и комплексных планов управления информационными процессами КФС наименее чувствительные к заданным классам возмущающих воздействий.

Третий разработанный в диссертации программный модуль и соответствующие сервисы позволяют решать задачи анализа и синтеза технических характеристик узлов КФС. Первый из данных сервисов, обеспечивает решение задачи имитация реализации синтезированного центральным модулем плана функционирования КФС в условиях случайных возмущений. В

результате его работы формируется количественная оценка показателя устойчивости синтезированной технологии и соответствующего плана управления информационными процессами в КФС по отношению к заданному классу возмущающих воздействий. Второй сервис обеспечивает реализацию итерационной процедуры оптимизации выбранных показателей качества для фиксированной технологии и плана управления информационными процессами в При. В ходе проведённых многочисленных экспериментов с использованием данной процедуры была выявлена закономерность, состоящая в том, что при достижении определённого порога производительности ресурсов и пропускной способности каналов связи, дальнейшее их увеличение не оказывает положительного влияния на качество функционирования системы. Благодаря этому выводу становится очевидно, что для реальных несбалансированных КФС возможно обоснованно определить минимально необходимые значения характеристик её элементов, дальнейшее улучшение которых будет нецелесообразно. На основании этих значений может быть проведено «выравнивание» параметров элементов КФС, что, в конечном итоге, позволит существенно сократить её стоимость без потери качества функционирования. Пример зависимости показателя качества функционирования КФС от производительности её элементов приведён на рисунке 9.

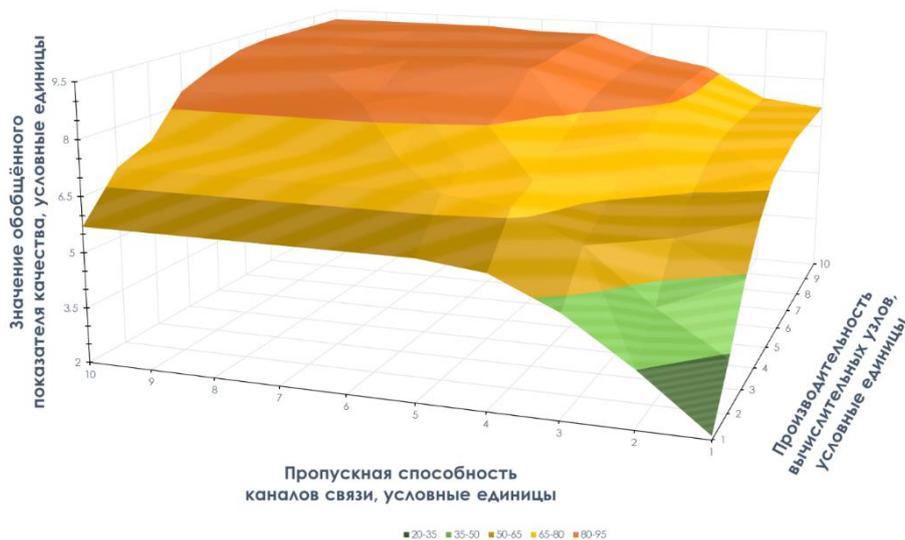


Рисунок 9. График результатов параметрического синтеза КФС

С точки зрения практического применения результатов диссертационных исследований важным является тот факт, что к настоящему моменту уже существуют все программно-аппаратные решения, необходимые для построения и применения КФС под управлением разработанного программного комплекса. Для иллюстрации этого в диссертации приведено подробное описание того, как разработанные концепты логико-динамических моделей управления КФС могут быть реализованы с использованием современных информационно-коммуникационных технологий. Так, например, концепт «ресурс» отображается на весь спектр вычислительных и сетевых устройств в промышленном интернете. Концепт «операция», с одной стороны, представляет собой программный код, выполняющий прикладные вычисления. С другой стороны, следуя известному подходу «устройство как сервис», этот концепт аналогично может представлять операции взаимодействия встроенных систем с физическим миром. Концепт «процесс», реализуемый в логико-динамической модели КФС с использованием ограничений специального вида, задающих последовательность выполнения операций, отображается на технологию управления бизнес-процессами, в частности, может быть представлен в виде упомянутой выше расширенной нотации BPMN.

Реализация результатов решения задачи синтеза технологии управления информационными процессами требует динамического перераспределения операций между доступными узлами промышленного интернета. То есть, согласно концепции туманных вычислений, один и тот же аппаратный ресурс должен быть способен в различные моменты времени выполнять разные операции. Проведённый в диссертационной работе анализ различных способов отображения

синтезированной технологии на техническую структуру промышленного интернета выявил необходимость использования для этой цели современной контейнерной виртуализации. При такой организации КФС все или большинство аппаратных ресурсов предоставляют унифицированную среду исполнения программных образов вычислительных операций. Сами образы операций хранятся в централизованном или распределённом реестре, доступном повсеместно в рамках КФС, и распределяются по ресурсам в соответствии с синтезированной технологией (см. рисунок 10).



Рисунок 10. Реализация синтезированной технологии на базе контейнерной виртуализации

В свою очередь, реализация результатов решения задачи *синтеза комплексных планов управления* информационными процессами требует наличия промежуточного программного обеспечения, осуществляющего запуск вычислительных операций (сервисов) в заданные моменты времени в соответствии с синтезированной технологией. Проведённый анализ существующих технологий и программных средств «оркестровки» веб-сервисов показал целесообразность использования стандарта BPMN для записи синтезированного плана управления информационными процессами и исполнения его с помощью соответствующих средств интерпретации (существующих свободно распространяемых программных средств Apache ODE или Zeebe) и сервисной шины (например, свободно распространяемые решения OpenESB или WSO2).

Таким образом, разработанный программный комплекс используя в качестве входных данных альтернативный граф выполнения операций в расширенной нотации BPMN (рисунок 11), обеспечивает параллельное (одновременное) решение задач синтеза оптимальной технологии и робастных (и/или устойчивых) планов управления информационными процессами в КФС, а также формирует выходной исполняемый граф информационного процесса в формате BPMN (рисунок 12).

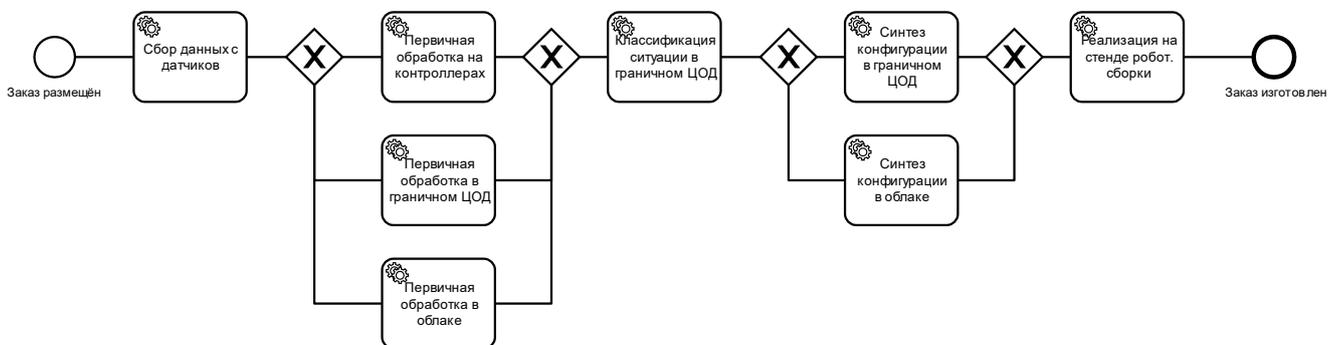


Рисунок 11. Исходный файл BPMN с альтернативным графом работ



Рисунок 12. Автоматически сгенерированный исполняемый файл BPMN

На основе интеграции описанных выше технологий и архитектур на рисунке 13 может быть предложен следующий обобщенный облик перспективной киберфизической системы с модулем синтеза технологий и комплексных планов управления информационными процессами.

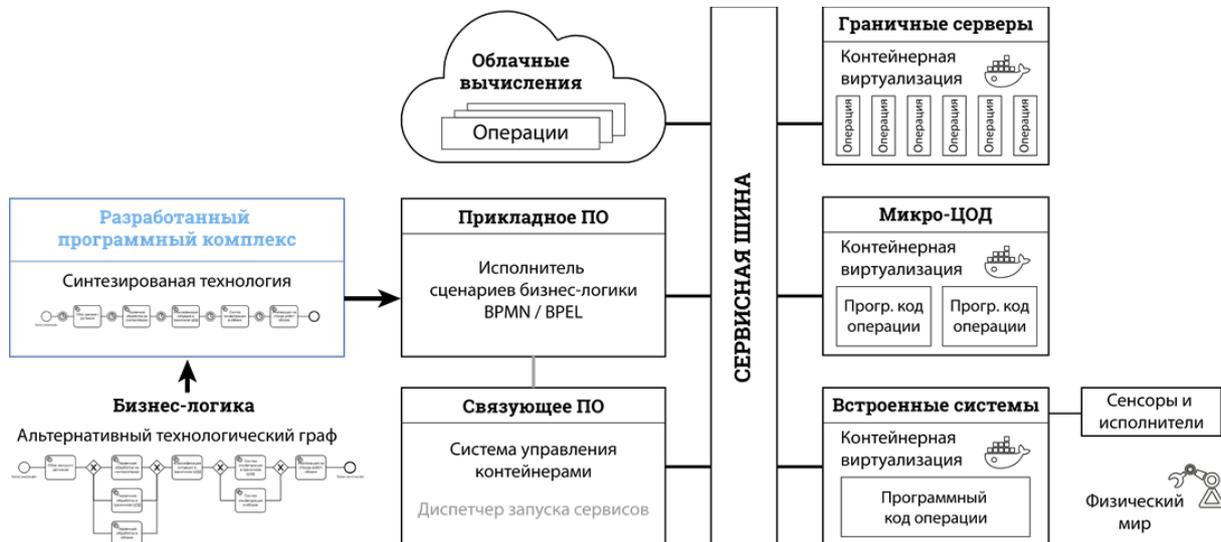


Рисунок 13. Обобщённый облик перспективной киберфизической системы

В пятой главе с единых методологических и методических позиций осуществлена разработка и реализация моделей, методов, алгоритмов и программ одновременного решения задач синтеза технологий и планов управления как информационными процессами в КФС, так и процессами создания и применения сложных технических объектов в динамически изменяющейся обстановке на примере объектов, входящих в состав судостроительного предприятия, орбитальных и наземных космических средств, а также описан пример решения практической задачи управления информационными процессами в системе оперативного прогнозирования речных наводнений. Таким образом, в данной главе иллюстрируется реализация главного достоинства разработанного модельно-алгоритмического и программного обеспечения управления КФС, состоящего в проведении корректной межмодельной координации, формально позволяющей на основе единого логико-динамического языка описать и решить задачи комплексного (системного) моделирования процессов управления КФС, задачи синтеза технологий и планов управления информационными процессами в них, задачи коррекции планов и перепланирования, а также задачи оперативного управления и мониторинга их состояния.

Первый пример применения разработанного математического и программного обеспечения посвящён оцениванию выполнимости, робастности и динамической устойчивости производственных программ судостроительного предприятия (СП). Потребность проведения комплексного моделирования функционирования СП на основе системно-управленческой и логико-динамической интерпретации информационных и технологических процессов обусловлена тем, что на практике, во-первых, наблюдается существенная структурная динамика СП, а, во-вторых, на указанных предприятиях имеется структурно-функциональная избыточность, которую можно целенаправленно использовать. В качестве примера такой избыточности на рисунке 14 приведён фрагмент альтернативного графа, задающего многовариантную технологию реализации производственных процессов. В этих условиях на СП появляется возможность в динамически складывающихся условиях на основе данных и информации, поступающих от соответствующих элементов киберфизических систем формировать и реализовывать гибкие производственные программы, а также планы информационного обеспечения данных программ.

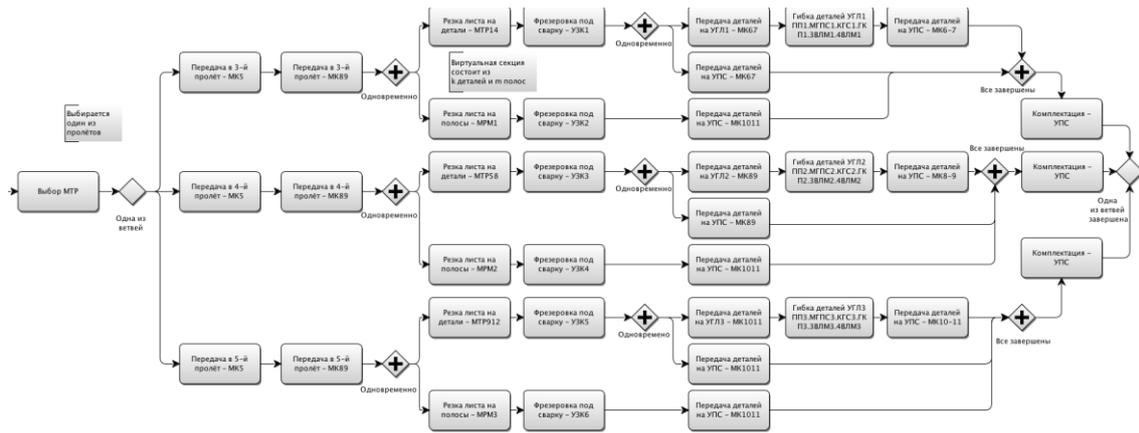


Рисунок 14. Фрагмент альтернативной производственной технологии функционирования корпусообработывающего и сборочно-сварочного производства

Таким образом, исследуемые в данной главе задачи управления производственными процессами судостроительного предприятия можно сформулировать как задачи синтеза технологии и планов управления информационными процессами соответствующей КФС.

На содержательном уровне данные задачи имеют следующую формулировку. Известно исходное структурное состояние ССП, известен состав, допустимые варианты структурного построения ССП, известны пространственно-временные, организационные, финансовые, технические и технологические ограничения, связанные с процессом модернизации ССП, заданы интервал времени, на котором осуществляется управление структурной динамикой ССП и соответствующая система показателей качества указанного управления.

Требуется найти такую последовательность управляющих воздействий на параметры и элементы ССП, при которой для каждого заданного сценария изменения возмущающих воздействий на ССП обеспечивался оптимальный переход данной системы из текущего в требуемое многоструктурное макросостояние.

На первом этапе решения данной задачи дополнительно необходимо решить задачи оценивания и анализа производственного потенциала ССП. В терминах задач оптимального управления сложными объектами указанный класс задач относится к классу задач оценивания их управляемости.

Перечисленные задачи были решены с использованием разработанного в диссертации программно-математического обеспечения. В частности, задача расчёта, оценки и анализа возможностей ССП по выполнению производственных планов решалась с использованием логико-динамических моделей программного управления структурной динамикой ССП, разработанных во второй главе диссертации, путём построения и анализа соответствующего аппроксимированного множества достижимости динамической системы, описывающей функционирование ССП. Значения показателей выполнимости производственных планов ССП были получены в результате проецирования множества достижимости (его аппроксимации) динамической системы на соответствующие оси системы координат в пространстве показателей качества функционирования ССП.

Задача синтеза технологии и комплексного плана функционирования ССП решена на основе методического аппарата, описанного в третьей главе диссертации, базирующегося на комбинированном использовании методов последовательных приближений и ветвей и границ.

На основе разработанного аналитического вычислительного модуля и архитектуры, описанных в четвёртой главе диссертации, был реализован программно-методический комплекс решения задачи оценивания выполнимости производственных планов ССП. В результате его работы формируется следующий состав выходных данных для оценки выполнимости производственной программы:

1. Процентная оценка выполнимости производственной программы.
2. Набор частных показателей качества реализации производственной программы для оптимистических и пессимистических сценариев изменения внешней и внутренней обстановок на ССП, включающих в себя показатели, оценивающие полноту выполнения технологических операций, нарушение директивных сроков, равномерность загруженности оборудования.
3. Общее время и конкретные интервалы времени планирования использования, а также доля загруженности каждой единицы оборудования предприятия.

Пример пользовательского интерфейса разработанного программного комплекса с выходными данными представлен на рисунке 15.

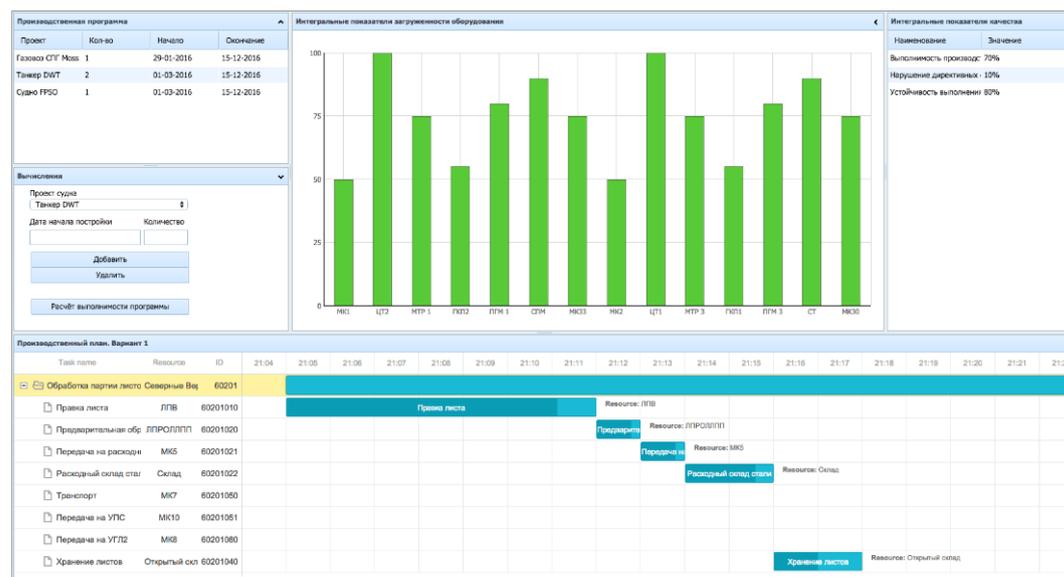


Рисунок 15. Пользовательский интерфейс с результатами работы

При разработке и использовании рассматриваемого программного комплекса, несмотря на наличие технических особенностей реализации, таких как стороннее унаследованное программное обеспечение, не поддерживающее стандарты веб-сервисов и отсутствие прямого интернет-соединения с некоторыми сторонними модулями комплекса, удалось остаться в рамках стандартов и предложенной ранее обобщённой архитектуры, что подтверждает практическую применимость изложенных в диссертации теоретических принципов построения современной киберфизической системы.

Второй пример посвящён решению задачи синтеза планов функционирования автоматизированных систем управления космическими аппаратами (КА). В настоящее время при проектировании, внедрении, эксплуатации и развитии систем управления (СУ) КА одной из актуальных проблем остается проблема автоматизации управления ими. В частности, в данном примере подробно исследовались две задачи: задача синтеза комплексных планов управления информационными процессами в центре управления полётом (ЦУП) навигационными КА (НКА) и задача синтеза технологии совместного планирования и управления работой бортового комплекса управления КА и средств соответствующего наземного комплекса управления (НКУ) применительно к космическим аппаратам дистанционного зондирования Земли (КА ДЗЗ).

В задаче, посвящённой навигационным космическим аппаратам, было проведено сравнение результатов, полученных с помощью разработанного в данной диссертации программно-математического обеспечения, с результатами, полученными с помощью широко используемых на практике эвристических алгоритмов построения расписаний. На рисунке 16 (а) наглядно представлен эвристический план функционирования ЦУП НКА, а на рисунке 16 (б) – оптимальный план. Из рисунка видно, что улучшение показателя качества полученного решения (плана) достигается за счёт рационального упорядочивания операций и распределения вычислительных ресурсов.

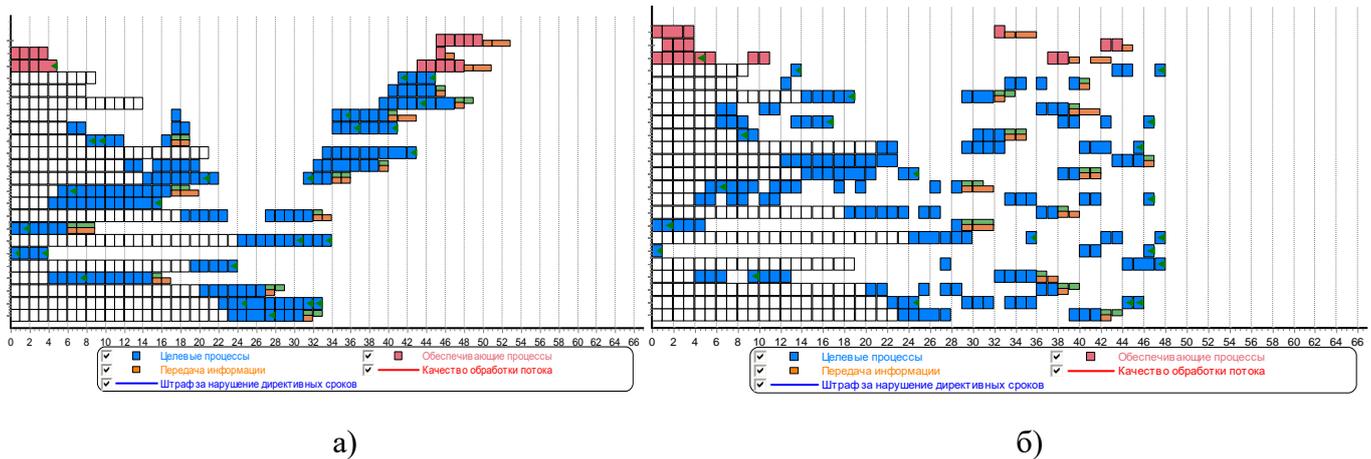


Рисунок 16. Эвристический (а) и оптимальный (б) план управления информационными процессами в ЦУП НКА

На основе оптимальных (эталонных) решений для нескольких опорных точек, соответствующих типовым вариантам исходных данных, была определена целесообразность использования эвристических (LIFO - «первый пришёл, первым обслуживается», FIFO - «первый пришёл, последним обслуживается», ZIM - метод И.Н. Зимина, Ю.П. Иванилова) или оптимального алгоритмов. На рисунке 17 представлен фрагмент графика, отображающего нормированные значения показателей качества для некоторых типовых вариантов исходных данных. Значения показателя качества эвристических решений рассчитываются как доли эталонного решения, принятого за 100%.

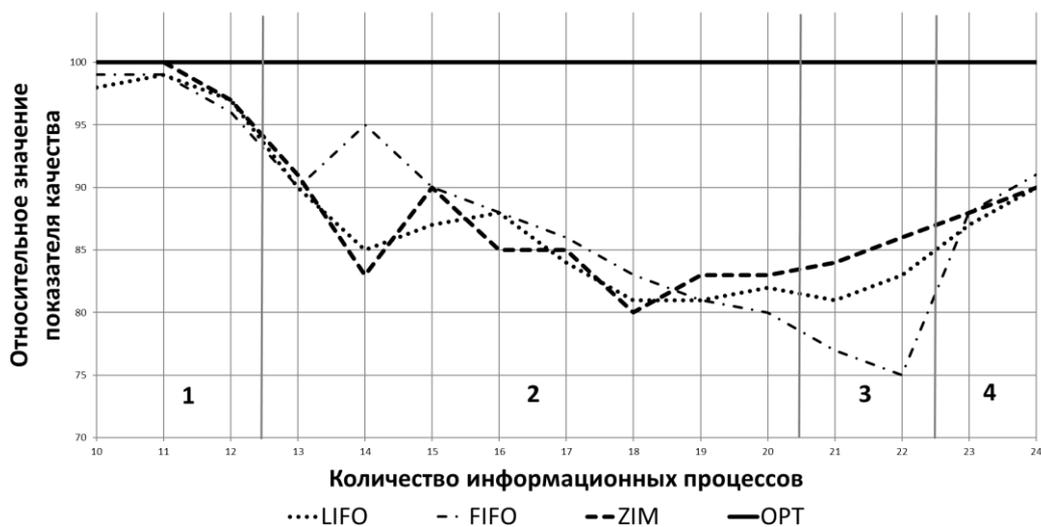


Рисунок 17. Относительные значения показателя качества для некоторых типовых вариантов исходных данных

Подробное описание рисунка 17 приведено в диссертационной работе, но главный вывод следующий – во всём диапазоне исходных данных существуют такие области сочетания параметров, при которых применение методов оптимизации не улучшает качество решения по сравнению с эвристическими алгоритмами, но есть и области, в которых выигрыш от использования предлагаемых методов оптимизации может достигать 30% по сравнению с «эвристикой».

Эксперименты с оцениванием робастности построенных планов управления информационными процессами также позволили выявить ряд закономерностей и рекомендаций, основная из которых заключается в том, что самую низкую чувствительность к возмущающим воздействиям демонстрируют комплексные планы, в которых операции равномерно распределены по большому количеству ресурсов со схожими характеристиками, а самую высокую – планы с несколькими задействованными вычислительными машинами с сильно различающимися характеристиками.

В задаче синтеза технологии совместного планирования и управления работой бортового комплекса управления КА и средств НКУ применительно к космическим аппаратам дистанционного зондирования Земли (КА ДЗЗ) требовалось наилучшим образом на заданном интервале времени распределить функции управления между бортовым и наземным комплексом управления КА ДЗЗ с точки зрения критериев максимального быстродействия и минимальных затрат энергии в условиях известных пространственно-временных, технических и технологических ограничений. Описанная задача также была решена с использованием разработанного в диссертации программно-математического обеспечения.

На рисунке 18 схематично представлены исходные данные, используемые при решении данной задачи: в верхней части на альтернативном графе информационного процесса выделены три альтернативных варианта распределения функций управления, в нижней части приведён пример синтезированной технологии и представлены усреднённые результаты решения данной задачи. На рисунке 19 представлен пример пользовательского интерфейса, демонстрирующий синтезированную технологию и ряд вспомогательных результатов.

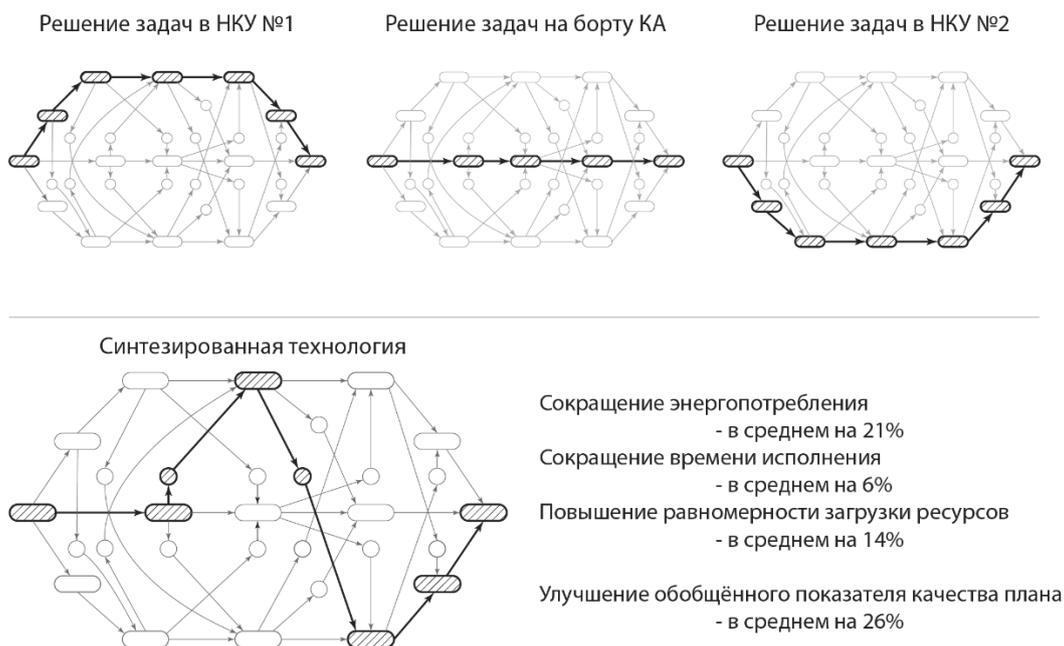


Рисунок 18. Графическое представление результатов решения задачи распределения функций управления



Рисунок 19. Пользовательский интерфейс, демонстрирующий результаты решения задачи

В третьем примере рассматривается задача управления информационными процессами в системе оперативного прогнозирования речных наводнений. В классификации, используемой Консорциумом промышленного интернета, эта задача относится к разделу «Умный город» и по значимости не уступает остальным областям применения киберфизических систем и промышленного интернета.

Необходимость применения методов синтеза технологий и комплексных планов управления информационными процессами в системе оперативного прогнозирования речных наводнений продиктована рядом причин. Во-первых, данная система имеет существенную функциональную избыточность из-за своей высокой гетерогенности, территориальной распределённости, ведомственной разобщённости и большому включению унаследованных элементов. Во-вторых, для достижения высокого качества прогнозов принципиально важным является использование при расчётах не одной, а комплекса гидрологических и гидродинамических моделей с возможностью адаптации их параметров в зависимости от складывающейся обстановки. В-третьих, время на выполнение полного цикла моделирования ограничено (система мягкого реального времени). В-четвёртых, элементы рассматриваемой системы прогнозирования наводнений, как типичного представителя класса киберфизических систем, изменяют свои характеристики под действием внешних и внутренних факторов, то есть, присутствует структурная динамика.

На рисунке 20 представлен пример альтернативного графа технологического цикла оперативного моделирования наводнений, с помощью которого конструктивно задаётся указанная выше функциональная избыточность. Важно отметить, что от выбора способа реализации технологии оперативного моделирования наводнений зависит точность прогноза, так как некоторые ветви альтернативного графа содержат операции параметрической адаптации гидрологических моделей, позволяющие улучшить качество получаемого результата, но и требующие значительных ресурсно-временных затрат.

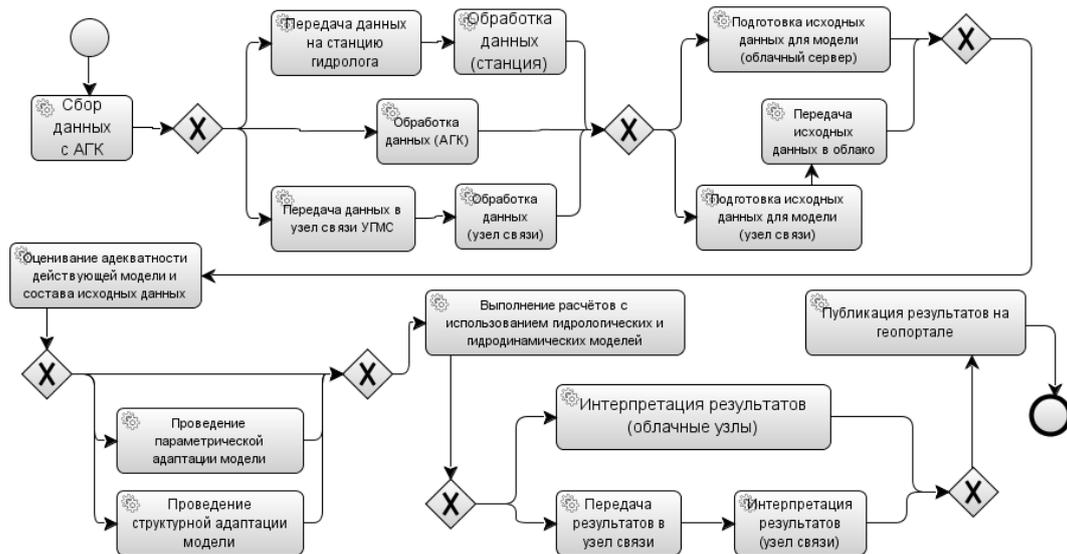


Рисунок 20. Агрегированный альтернативный граф технологического цикла оперативного моделирования наводнений

Таким образом, возникает актуальная научно-техническая задача синтеза технологии и соответствующих комплексных планов управления информационными процессами, при которых бы обеспечивался наилучший уровень адекватности моделирования и точности прогнозирования паводка при заданных временных ограничениях.

Для решения поставленной задачи действующая система оперативного прогнозирования речных наводнений была модифицирована с целью встраивания в неё разработанного модуля управления информационными процессами и всех сопутствующих технологий: контейнерной виртуализации и интерпретатора нотации BPMN. Все допустимые варианты реализации информационного процесса, соответствующего полному циклу моделирования, были зафиксированы в нотации BPMN графическим способом в виде альтернативного графа, прикладные вычислительные операции переведены в образы виртуальных машин и размещены в едином

реестре, унифицированные вычислительные ресурсы снабжены средой исполнения виртуальных машин. В качестве промежуточного программного обеспечения, исполняющего синтезированную технологию и комплексный план, использовалась сервисная шина WSO2 и встроенный в неё интерпретатор BPMN на базе Apache ODE.

В результате применения разработанного в ходе диссертационной работы модуля управления информационными процессами в системе прогнозирования наводнений удалось достичь повышения точности прогноза на 16,7% при фиксированном времени реализации информационного процесса, ресурсах и прочих равных условиях по сравнению с применением существующего эвристического диспетчера, используемого для организации вычислительных процессов. Повышение точности оперативного прогноза стало возможным благодаря целенаправленному упорядочению операций при планировании функционирования созданной информационной системы, позволившему найти резервы времени, необходимые для проведения параметрической адаптации гидродинамических моделей.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В рамках диссертационной работы на основе проведённых исследований получено решение важной научно-технической проблемы создания основ прикладной теории синтеза технологий и комплексных планов управления информационными процессами в киберфизических системах, внедрение которой в отечественную производственную сферу обеспечит значительный вклад в развитие экономики страны за счёт повышения производительности предприятий, снижения себестоимости выпуска продукции и повышения её конкурентоспособности.

В процессе решения сформулированной проблемы получены следующие научные результаты, составляющие итоги исследования:

1. Проведен системный анализ и формализация проблемы синтеза технологий и программ управления информационными процессами в промышленном интернете. В результате анализа был сделан вывод, что основное предназначение промышленного интернета связано с реализацией перспективных клиент-ориентированных и гибких производств, характеризующихся непостоянством процессов, а вместе с ними и характеристик соответствующих информационных потоков, а также вычислительных процессов. Выявлено, что для эффективного управления такими производствами, необходимо создать новую архитектуру, модели, методы, алгоритмы и программные комплексы управления соответствующими распределёнными КФС, объединёнными в промышленный интернет. Обобщенное формальное описание общей проблемы управления структурной динамикой КФС позволило с единых методологических, методических и технологических позиций подойти к анализу и обоснованному выбору путей решения уже конкретных классов задач синтеза технологий и программ управления информационными процессами промышленного интернета.

2. Разработан и исследован комплекс моделей синтеза технологий и программ управления информационными процессами в промышленном интернете. В его состав вошли логико-динамические модели управления движением, каналами, ресурсами, комплексами и параметрами целевых, обеспечивающих и вспомогательных операций, потоками и структурами КФС. Учёт в явном виде базовых логических функций и соответствующих ограничений с сохранением синтезируемых программных управлений КФС в классе кусочно-непрерывных функций позволил на конструктивной основе использовать фундаментальные и прикладные результаты, полученные как в классической, так и современной теории управления.

3. Разработаны и исследованы методы и технологии системного моделирования процессов синтеза технологий и программ проактивного управления информационными процессами в промышленном интернете при различных сценариях воздействия внешней среды (факторов неопределенности). Их учёт осуществляется за счёт имитации условий реализации плана с учетом различных вариантов организации оперативного управления элементами и подсистемами КФС в конкретных ситуациях и структурной и параметрической адаптации плана, моделей, алгоритмов и программ к возможным состояниям объекта управления, управляющей подсистемы и среды.

4. На основе предложенной методики многокритериального оценивания, анализа и выбора наилучших системотехнических решений были обоснованы архитектура, состав, структура и вариантов функционирования программных комплексов, обеспечивающих решение исследуемой проблемы. При этом обработка сведений, получаемых в ходе данного опроса, проводилась с использованием нечётко-возможностного подхода и теории планирования экспериментов, направленных на извлечение экспертных знаний и формализацию их в виде обобщенного интегрального показателя качества базовой архитектуры создаваемой информационной платформы. Благодаря использованному подходу в основу разработанного программного комплекса были положены те интеллектуальные информационные технологии, которые наилучшим образом подходят для решения ряда типовых прикладных задач промышленного интернета, в частности, перечня задач, представленных в пятой главе диссертации.

5. Разработаны и исследованы комбинированные методы, алгоритмы и программные комплексы решения задач оценивания возможностей и обеспечения устойчивости управления информационными процессами в промышленном интернете. Используя данные методы и алгоритмы удалось исходную задачу управления КФС, традиционно рассматриваемую как дискретную, свести к нелинейной краевой задаче, то есть, редуцировать задачу выбора в дискретных пространствах к задачам выбора в конечномерных пространствах, что существенно упростило в дальнейшем процедуры поиска оптимальных решений. Алгоритмы оценивания целевых и информационно-технологических возможностей КФС по ряду предложенных показателей основаны на построении и аппроксимации областей достижимости, то есть, направлены на решение задач оценки управляемости динамических систем, описывающих процессы функционирования КФС. Процедура решения задачи проактивного управления КФС состоит из нескольких этапов, реализуемых на единой методологической и модельной основе, основные из которых: оценка целевых и информационно-технологических возможностей КФС, формирование допустимых планов её функционирования; оптимизация управления в КФС; оценка устойчивости полученного управления; анализ и интерпретация результатов решения задачи. Разработанный программный комплекс, реализующий указанные комбинированные методы и алгоритмы, построен на основе языка программирования Python и ряде современных эффективных инструментальных программных средств. Благодаря применению формата XML и стандартов веб-сервисов во всех операциях обмена данными, программный комплекс представлен в виде открытой системы, способной как к автономной работе, так и готовой к беспрепятственной интеграции со сторонними системами.

6. Предложено и обосновано необходимое расширение языка описания бизнес-процессов BPMN для обеспечения возможности использования его в качестве единой основы для согласования моделей разработанного полимодельного комплекса, а также использования при решении прикладных задач с использованием разработанного программного комплекса. Данное расширение дополняет BPMN новыми сущностями, соответствующими концептам логико-динамической модели, что предоставляет возможность, находясь в рамках существующих стандартов, отделить конструктивное описание функциональной структуры промышленного интернета от технических особенностей её аппаратно-программной реализации. Такая декомпозиция выводит на новый качественный уровень практическую значимость разработанного программного комплекса за счёт обеспечения возможности беспрепятственной работы с ним пользователей различных уровней – от технологов и аналитиков до технических специалистов и разработчиков.

7. Разработана методология и технологии использования контейнерной виртуализации в промышленном интернете для реализации комплексных планов управления информационными процессами на этапе эксплуатации. Существующие технологии, применяемые в промышленном интернете, были сопоставлены концептам логико-динамической модели и сущностям нотации BPMN. В ходе анализа было выявлено, что структура разработанных логико-динамических моделей в высокой степени соответствует структуре, применяемой в современной технологии контейнерной виртуализации и может быть эффективно реализована на её основе с применением сервис-ориентированной архитектуры под управлением сервисной шины с поддержкой стандарта BPMN 2.0 или языка исполнения бизнес-процессов BPEL.

8. Решены прикладные задачи синтеза технологий и планов функционирования бортовых и наземных комплексов управления космическими аппаратами, планов функционирования судостроительного предприятия, комплексного оперативного многовариантного прогнозирования наводнений. Указанные модельно-алгоритмические и программно-информационные решения, реально реализованные в различных предметных областях, подтвердили практическую значимость и эффективность разработанной методологии решения задач синтеза технологий и программ управления информационными процессами в промышленном интернете.

Рекомендации, перспективы дальнейшей разработки темы. Наряду с решёнными в диссертации задачами, следует отметить необходимость дальнейших исследований, направленных на решение новых задач:

- задача синтеза оптимальных программ мониторинга состояния информационных процессов и ресурсов промышленного интернета;
- задача управления операциями на этапе реализации информационного процесса в условиях возмущающих воздействий внешней среды или изменения целей функционирования КФС;
- задача координирования различных уровней функционирования промышленного предприятия на базе предложенного комплекса логико-динамических моделей.

В направлении развития программного комплекса требуется также уделить внимание:

- более глубокой интеграции разработанных вычислительных модулей в архитектуру промышленного интернета на уровне связующего программного обеспечения;
- этапу реализации информационных процессов, в частности, использованию рассчитанных динамических приоритетов в процессе диспетчеризации вычислительных операций;
- обеспечению непрерывности вычислительных процессов, катастрофоустойчивости промышленного интернета и самоорганизации вычислений.

Соответствие паспортам специальностей. Результаты проведенной диссертационной работы соответствуют паспорту специальности 05.13.11 – Математическое и программное обеспечение вычислительных машин, комплексов и компьютерных сетей:

П. 8. Модели и методы создания программ и программных систем для параллельной и распределенной обработки данных, языки и инструментальные средства параллельного программирования.

П. 9. Модели, методы, алгоритмы и программная инфраструктура для организации глобально распределенной обработки данных.

А также паспорту специальности 05.13.01– «Системный анализ, управление и обработка информации»:

П. 2. Формализация и постановка 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. **Потрясаев С.А.** Комплексное моделирование сложных процессов на основе нотации BPMN // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. 2016. №11. С. 913-920.
2. **Потрясаев С. А.** Математическое и программное обеспечение синтеза технологий и планов работы киберфизических систем // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. 2018. Т. 61, № 11. С. 939-946.

3. Гниденко А.С., **Потрясаев С.А.**, Ростова Е.Н. Модели и алгоритмы оценивания устойчивости планов функционирования сложных технических объектов // Информатизация и связь. 2019. № 2. С. 103-111.
4. Кулаков А.Ю., Павлов А.Н., **Потрясаев С.А.**, Соколов Б.В. Методы, алгоритмы и технологии реконфигурации бортовых систем маломассоразмерных космических аппаратов // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. 2018. Т. 61. № 7. С. 596-603.
5. Бураков В.В., Зеленцов В.А., **Потрясаев С.А.**, Соколов Б.В. Оценивание и выбор эффективных технологий автоматизированного управления активными подвижными объектами на основе комплексного моделирования // Доклады ТУСУРа. - 2014. - № 4 (34). - С. 155-164.
6. Соколов Б.В., Птушкин А.И., Иконникова А.В., **Потрясаев С.А.**, Юсупов Р.М., Цивирко Е.Г. Анализ состояния исследований проблем управления жизненным циклом искусственно созданных объектов // Труды СПИИРАН. 2011. № 1 (16). С. 37-109.
7. Teilans A.A., Romanovs A.V., Merkuryev Yu.A., Dorogovs P.P., Kleins A.Ya., **Potryasaev S.A.** Assessment of cyber physical system risks with domain specific modelling and simulation // Труды СПИИРАН. 2018. № 4 (59). С. 115-139.
8. Зеленцов В.А., **Потрясаев С.А.**, Соколов Б.В., Скобцов В.Ю., Кореняко С.А., Ким Д.С., Вакульчик Е.Н., Кульбак Л.И., Николаеня Е.Д., Лапицкая Н.В., Саксонов Р.В. Сервис-ориентированный распределённый программный комплекс для оценивания и многокритериального анализа показателей надёжности и живучести бортовой аппаратуры малых космических аппаратов: российский и белорусский сегменты // Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. 2017. Т. 16. № 4. С. 118-129.
9. Волков В.Ф., Ковалев А.П., **Потрясаев С.А.**, Салухов В.И. Алгоритм оперативного управления ресурсами при развертывании систем информационного обеспечения сложных технических комплексов // Труды СПИИРАН. 2016. № 1 (44). С. 83-97.
10. Лектауэрс А.И., Охтилев М.Ю., **Потрясаев С.А.**, Соколов Б.В., Чуприков А.Ю., Шмелев В.В. Анализ перспективных подходов к решению задач комплексного моделирования технологий самоуправляемых вычислений в критических приложениях // Труды СПИИРАН. 2013. № 6 (29). С. 144-169.
11. Бураков В.В., Зеленцов В.А., **Потрясаев С.А.**, Соколов Б.В., Калинин В.Н. Методологические и методические основы оценивания и выбора эффективных технологий автоматизированного управления активными подвижными объектами на основе комплексного моделирования // Научные технологии в космических исследованиях Земли. 2016. Т. 8. № 3. С. 6-12.
12. **Потрясаев С.А.** Синтез сценариев моделирования структурной динамики АСУ активными подвижными объектами // Приборостроение. 2014. №11.
13. Романов А.В., Лектауэрс А.И., Меркурьева Г.В., Чумик А.А., **Потрясаев С.А.**, Рогачев С.А. Обобщенное описание и классификация моделей эколого-технологических объектов наземно-космического мониторинга // Труды СПИИРАН. 2013. Т. 5. № 28. С. 122-142.
14. **Потрясаев С.А.**, Соколов Б.В., Юсупов Р.М. Содержательное и формальное описание проблемы структурно-функционального синтеза и управления развитием информационной системы наземно-космического мониторинга // Труды СПИИРАН. 2013. № 5 (28). С. 82-106.
15. Кокорин С.В., **Потрясаев С.А.**, Соколов Б.В. Комбинированный метод планирования операций и распределения ресурсов системы управления активными подвижными объектами // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. 2012. Т. 55. № 11. С. 17-22.
16. Охтилев М.Ю., Зеленцов В.А., **Потрясаев С.А.**, Соколов Б.В. Концепция проактивного управления сложными техническими объектами и технологии ее реализации // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. 2012. Т. 55. № 12. С. 73-75.
17. Зеленцов В.А., Алабян А.М., Крыленко И.Н., Пиманов И.Ю., Пономаренко М.Р., **Потрясаев С.А.**, Семёнов А.Е., Соболевский В.А., Соколов Б.В., Юсупов Р.М. Модельно-ориентированная система оперативного прогнозирования речных наводнений // Вестник Российской академии наук. 2019. Т. 89. № 8. С. 831-843.

18. Зеленцов В.А., **Потрясаев С.А.** Архитектура и примеры реализации информационной платформы для создания и предоставления тематических сервисов с использованием данных дистанционного зондирования Земли // Труды СПИИРАН. 2017. Вып. 6(55), С. 86-113.
19. Алабян А.М., Зеленцов В.А., Крыленко И.Н., **Потрясаев С.А.**, Соколов Б.В., Юсупов Р.М. Создание интеллектуальных информационных систем оперативного прогнозирования речных наводнений // Вестник Российской академии наук, 2016, том 86, № 2, С. 127-137.
20. Зеленцов В.А., Крыленко И.Н., Пиманов И.Ю., **Потрясаев С.А.**, Соколов Б.В., Ахтман Й. Основы построения системы обработки данных дистанционного зондирования Земли на базе сервис-ориентированной архитектуры // Известия вузов. Приборостроение. 2015. Т. 58. № 3. С. 241-243.

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

21. Methodology and integrated modeling technologies for synthesis of cyber-physical production systems modernization programs and plans / Andrey Gnidenko, Vladislav Sobolevsky, **Semyon Potriasaev**, Boris Sokolov //IFAC Papers online. — 2019. — Vol. 52, no. 13. — Pp. 642–647.
22. Integrated Planning of Active Mobile Objects Control System with Allowance of Uncertainty Factors / S. V. Kokorin, **S. A. Potriasaev**, B. V. Sokolov et al. Proceedings 26th European Conference on Modelling and Simulation Ecms 2012. — 2012. — Pp. 115–120.
23. Models Adaptation of Complex Objects Structure Dynamics Control / B. V. Sokolov, V. A. Zelentsov, O. Brovkina, **S.A. Potriasaev** et al. // Intelligent Systems in Cybernetics and Automation Theory, Vol 2 — 2015. — Vol. 348 of Advances in Intelligent Systems and Computing. — Pp. 21–33.
24. **Potriasaev, S. A.** Analysis of Dynamic Scheduling Robustness with the Help of Attainable Sets / S. A. Potriasaev, B. V. Sokolov, D. A. Ivanov // 2014 International Conference on Computer Technologies in Physical and Engineering Applications (ICCTPEA). — 2014. — Pp. 143–144.
25. **Potriasaev, S. A.** Control Theory Application to Spacecraft Scheduling Problem / S. A. Potriasaev, B. V. Sokolov, D. A. Ivanov // 2014 International Conference on Computer Technologies in Physical and Engineering Applications (Icctpea). — 2014. — Pp. 145–146.
26. Structure Adaptation of Models Describing Scheduling Processes in Complex Technical-Organizational Systems (CTOS) / D. Ivanov, B. V. Sokolov, **S. A. Potriasaev** et al. Proceedings 27th European Conference on Modelling and Simulation ECMS 2013. — 2013. — Pp. 143–148.
27. Application of Object-Oriented Simulation in Evolutionary Algorithms / Y. Skobtsov, A. Sekirin, S. Zemlyanskaya, **S. Potriasaev** et al. // Automation Control Theory Perspectives in Intelligent Systems / Ed. by R. Silhavy, R. Senkerik, Z. K. Oplatkova et al. — 2016. — Vol. 466 of Advances in Intelligent Systems and Computing. — Pp. 453–462.
28. Creation of Intelligent Information Flood Forecasting Systems Based on Service Oriented Architecture / V. A. Zelentsov, **S. A. Potriasaev**, I. J. Pimanov, S. A. Nemykin // Automation Control Theory Perspectives in Intelligent Systems / Ed. by R. Silhavy, R. Senkerik, Z. K. Oplatkova et al. — 2016. — Vol. 466 of Advances in Intelligent Systems and Computing. — Pp. 371–381.
29. Advanced river flood monitoring, modelling and forecasting / G. Merkuryeva, Y. Merkuryev, B. V. Sokolov, **S.A. Potriasaev** et al. // Journal of Computational Science. — 2015. — Vol. 10. — Pp. 77–85.
30. A system for environmental monitoring of the Russian Vostochny spaceport / V. Mochalov, O. Grigorieva, O. Brovkina, **S. Potriasaev**. Global Change: A Complex Challenge. — 2015. — Pp. 50–53.
31. An Innovative Framework for Integrated Space-Ground Monitoring / G. Merkuryeva, Y. Merkuryev, A. Romanovs, **S. Potriasaev** et al. // Proceedings 7th International Conference on Computational Intelligence, Communication Systems and Networks CICSYN 2015. — 2015. — Pp. 20–24.
32. Intelligent Integrated Decision Support Systems for Territory Management / B. V. Sokolov, V. A. Zelentsov, O. Brovkina, **S.A. Potriasaev** et al. // Artificial Intelligence Perspectives and Applications. — 2015. — Vol. 347 of Advances in Intelligent Systems and Computing. — Pp. 321–331.
33. Complex Objects Remote Sensing Forest Monitoring and Modeling / B. V. Sokolov, V. A. Zelentsov, **S.A. Potriasaev** et al. // Modern Trends and Techniques in Computer Science / Ed. by R. Silhavy, R. Senkerik, Z. K. Oplatkova et al. — 2014. — Vol. 285 of Advances in Intelligent Systems and Computing. — Pp. 445–453.

34. Complex Objects Remote Sensing Monitoring and Modeling: Methodology, Technology and Practice / B. V. Sokolov, V. A. Zelentsov, **S.A. Potriasaev** et al. // 2013 8th Eurosim Congress on Modelling and Simulation (Eurosim). — 2013. — Pp. 443–447.
35. Development of intelligent information systems for operational river-flood forecasting / A. M. Alabyan, I. N. Krylenko, **S. A. Potryasaev** et al. // Herald of the Russian Academy of Sciences. — 2016. — Vol. 86, no. 1. — Pp. 24–33.

В других изданиях:

36. **С.А. Потрясаев**, С.Я. Любич. Комбинированная модель и алгоритм планирования перевозок грузов // Логистика: современные тенденции развития, 14, 15 апреля 2011 г. Материалы X Международной научно-практической конференции. СПб: СПбГИЭУ, 2011. С. 305–307.
37. B. Sokolov, **S. Potryasaev**, V. Zelentsov, D. Ivanov, Yu. Merkurjev. Methodology and Technique of Structure-Functional Synthesis and Development Management for Disaster-Tolerant Transport-Logistic and Information Systems // VII российско-немецкая конференция “Гибкость и адаптивность глобальных цепей поставок”, РФ, г. Санкт-Петербург, 16-19 мая 2012 г.: Материалы конференции. С.216-224.
38. **С.А. Потрясаев**, Б.В. Соколов, Е.Г. Цивирко, В.А. Зеленцов. Результаты решения задачи комплексного планирования операций и распределения ресурсов в корпоративной информационной системе // Проблемы управления и моделирования в сложных системах: труды XIV Международной конференции, 19–22 июня 2012 г., г. Самара, С.686 – 691.
39. Охтилев М.Ю., Зеленцов В.А., Соколов Б.В., **Потрясаев С.А.** Методология и интеллектуальная технология проактивного мониторинга и управления сложными техническими объектами. //Проблемы управления и моделирования в сложных системах: Труды XVМеждународной конференции (25-28 июня 2013 г. Самара, Россия). – Самара: Самарский научный центр РАН, 2013. – С. 403 – 408.
40. Соколов Б.В., Крылов А.В., Охтилев М.Ю., Охтилев П.А., **Потрясаев С.А.** Логико-динамическая модель и алгоритмы комплексного планирования функционирования автоматизированной системы управления активными подвижными объектами // В сборнике: Проблемы управления и моделирования в сложных системах. Труды XIX Международной конференции. 2017. С. 508-513.
41. Зеленцов В.А., **Потрясаев С.А.**, Соколов Б.В., Цивирко Е.Г. Концептуальные и методические основы планирования развития корпоративных информационных систем // Управление развитие крупномасштабных систем MLSD’2012, Россия, Москва, 1–3 октября 2012 г.: Материалы шестой международной конференции. С.303-306.
42. **Потрясаев С.А.**, Соколов Б.В. Технология организации аналитико-имитационного моделирования асу активными подвижными объектами // Сборник докладов шестой всероссийской научно-практической конференции «Имитационное моделирование. Теория и практика» (ИММОД-2013). Том 1. // Издательство «ФЭН» Академии наук РТ, Казань, 2013, с. 236-240.
43. B.V.Sokolov, M.Yu.Okhtilev, V.A.Zelentsov, **S.A.Potrasaev**. New Information Intelligent Monitoring Technology for Complex Technical Objects under Dynamic Conditions in Real Time. // 5th european conference for aeronautics and space sciences (EUCASS), 2013, Munich, Germany, p. 341.
44. Ivanov D.A., Sokolov B.V., **Potryasaev S.A.** A Dynamic Model and An Algorithm for Supply Chain Scheduling Problem Solving // 16th International Conference on Harbor, Maritime and Multimodal Logistics Modelling and Simulation, HMS 2014 16. 2014. С. 85-91.

Патенты и свидетельства о регистрации программ для ЭВМ:

45. Пат. 2542666 Российская Федерация, МПК G07C 3/08. Устройство для определения оптимального периода управления техническим состоянием изделия / Соколов Б.В., Смагин В.А., Гришин В.Д., **Потрясаев С.А.**, Павлов А.Н.; заявитель и патентообладатель Научно-технический центр Инновационных космических технологий СПИИРАН. – опубл. 19.02.2014.
46. Пат. 2565890 Российская Федерация, МПК G07C 3/00. Устройство для определения параметров стратегии технического обслуживания средств системы / Соколов Б.В., Гришин В.Д., **Потрясаев С.А.**, Москвин Б.В.; заявитель и патентообладатель Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Санкт-Петербургский институт информатики и автоматизации РАН. – опубл. 20.10.2015.
47. Зеленцов В.А., **Потрясаев С.А.**, Пиманов И.Ю., Соколов Б.В., Кожанов А.Н.: Информационно-аналитическая система мониторинга и управления развитием территорий «Регион-В». Свидетельство № 2016612635. Зарегистрировано в реестре программ для ЭВМ 02.03.2016.
48. Зеленцов В.А., **Потрясаев С.А.**, Пиманов И.Ю., Соколов Б.В., Пащенко А.Е.: Программа «Унисон Про» для интеграции разнородных информационных ресурсов в системах поддержки принятия решений в различных предметных областях. Свидетельство № 2016660672. Зарегистрировано в реестре программ для ЭВМ 20.09.2016.
49. Соколов Б.В., Зеленцов В.А., **Потрясаев С.А.**, Пиманов И.Ю., Пащенко А.Е.: Распределенный программный комплекс автоматизации моделирования и прогнозирования наводнений. Свидетельство № 2017612937. Зарегистрировано в реестре программ для ЭВМ 06.03.2017.
50. Долматов М.А., Плотников А.М., Девятков В.В., Девятков Т.В., Нифантьев Е.А., Федотов М.В., Соколов Б.В., Павлов А.Н., Пащенко А.Е., **Потрясаев С.А.** Приложение для автоматизированной генерации имитационных моделей, их хранения и проведения экспериментов (АС «Сириус»). Свидетельство № 2016610247. Зарегистрировано в реестре программ для ЭВМ 11.01.2016.